

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Davut KELEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Vezir AYHAN

Ekim 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

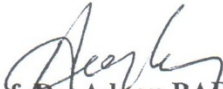
BİR RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ

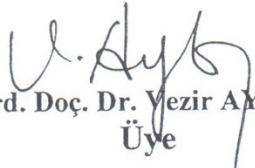
YÜKSEK LİSANS TEZİ

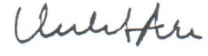
Davut KELEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Bu tez / /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Adnan PARLAK
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr. Yezir AYHAN
Üye


Yrd. Doç. Dr. Vedat ARI
Üye

ÖNSÖZ

Günümüzde hızla değişen ve gelişen teknoloji dünya üzerinde enerji ihtiyacının artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda enerji ihtiyacını öz kaynaklarıyla karşılayan ülkeler bu teknoloji atılımında önemli bir yere sahiptirler. Ülkelerin konumlarını daha iyi duruma getirmesi için ekolojik dengeyi göz önüne alarak enerji üretim tesisleri kurması gelecekte ayakta kalabilmeleri için önemli bir adımdır. Bu nedenle ülkemizin alternatif enerji kaynaklarına yönelmesi gereklidir.

Türkiye, konumu ve coğrafi yapısı itibari ile önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin öncelikle ulusal anlamda değerlendirilmesi ve enerji açığının öz kaynaklardan temin edilmesi gerekmektedir.

Tez çalışmam süresince çalışmalarımı teşvik eden, yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Vezir AYHAN' a minnet borçluyum. Çalışmamın her aşamasında bilimsel katkılarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Adnan PARLAK' a teşekkürlerimi sunarım. Elektrik donanım kısmında yardımlarını esirgemeyen Dr. Arş. Gör. Barış BORU' ya, tez yazım aşamasında yardımcı olan Arş. Gör. İdris CESUR' a, teşekkür ederim. Tüm katkılarından dolayı Sayın Şerafettin YİĞİT' e (Yiğit İnşaat Taah. Tic.) ve benimle birlikte bu yolu yürüten eşime teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 20115001074). SAÜ-BAPK' a desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv

BÖLÜM 1

RÜZGAR ENERJİSİ

1.1. Giriş.....	1
-----------------	---

BÖLÜM 2

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	5
2.1. Enerji.....	5
2.2. Odun.....	7
2.3. Hidrolik Güç.....	7
2.4. Güneş Enerjisi.....	8
2.5. Jeotermal Enerji	9
2.6. Biokütle Enerjisi.....	10
2.7. Deniz Enerjisi.....	10
2.8. Hidrojen Enerjisi.....	11
2.9. Rüzgar Enerjisi.....	12
2.9.1. Rüzgarın Oluşumu.....	13
2.9.2. Rüzgarın Çeşitleri.....	15

2.9.2.1. Küresel Rüzgarlar.....	18
2.9.2.2. YüzeY Rüzgarları.....	18
2.9.2.3. Yerel Rüzgarlar.....	19
2.9.2.4. Deniz Rüzgarları.....	19
2.9.2.5 Dağ Rüzgarları.....	19
2.9.3. Türkiye' nin Rüzgar Enerji Potansiyeli.....	19
2.9.4. Dünyanın Rüzgar Enerji Potansiyeli.....	22

BÖLÜM 3

RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE TÜRBİN BİLEŞENLERİ.....	26
3.1. Türbinin İç Yapısı.....	26
3.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	30
3.2.1. Düşey Eksenli Ve Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	30
3.2.1.1. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	30
3.2.1.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri.....	32
4.2.1.2.1. Yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinleri... ..	33
4.2.1.2.2. Yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri..	33
3.2.2. Önden rüzgarlı türbinler.....	34
3.2.3. Arkadan rüzgarlı türbinler.....	35
3.3. Güç Kontrolü Sistemine Göre Sınıflandırma.....	35
3.3.1. Stall kontrollü türbinler.....	35
3.3.2. Pitch kontrollü türbinler.....	36
3.3.3. Aktif stall kontrollü türbinler.....	37
3.4. Rotor Hızına Göre Sınıflandırma	39
3.4.1. Sabit hızlı türbinler.....	39
3.4.2. Değişken hızlı türbinler.....	39

BÖLÜM 4

RÜZGARIN GÜCE DÖNÜŞÜMÜ.....	41
4.1. Rüzgar Türbini Kanat Karakteristiği.....	42
4.1.1. Rüzgar Türbini Kanat Profili.....	43
4.1.2. Kanat Sayısının Etkisi.....	48

4.1.3. Kanat Yapımında Kullanılan Malzemeler.....	49
4.2. Rüzgar Türbininin Karakteristikleri.....	50
4.2.1. Uç Hız Oranı.....	50
4.2.2. Katılık Oranı.....	52
4.2.3. Faydalı Güç.....	53
4.3. Rüzgar Türbininin Aerodinamik Verimi.....	53
4.4. Kayıplar.....	56

BÖLÜM 5

RÜZGAR TÜRBİNİ MODELLENMESİ VE DİZAYNI.....	59
5.1. Gerekli Güç.....	59
5.2. Rotor hesaplamaları.....	60
5.2.1. Rotor Çapının Belirlenmesi.....	60
5.2.2. Rotor Çevresel Hızı.....	60
5.2.3. Rotor çevresi.....	61
5.2.4. Rotor Devri.....	62
5.2.5. Rotor Süpürme Alanı.....	62
5.2.6. Rotorda Oluşan Giriş Gücü.....	62
5.2.7. Rotor Milinin Yataklanması.....	63
5.2.8. Burulma momenti.....	64
5.2.9. Eğilme Momenti.....	65
5.2.10. Birleşik Moment.....	66
5.2.11. Mukavemet Momenti.....	66
5.3. Rotor Kanat Profili.....	67
5.3.1. Kanat Seçimi.....	67
5.3.2. Kanat Sayısının Belirlenmesi.....	75
5.3.3. Kanat sayısı İle Rotor Devri Arasındaki İlişki.....	75
5.4. Jeneratör.....	76
5.5. Dişli Kutusu Tasarımı.....	78
5.6. Platform ve Kule.....	79
5.7. Fren.....	81
5.8. Yönlendirici.....	82

5.9. Elektriğin Taşınması.....	83
5.10. Ana Gövde.....	83
5.11. Rüzgar Türbin Montajı.....	84
BÖLÜM 6	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	97

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

GRP	: Fiberglass ile güçlendirilmiş plastic
CFRP	: Karbonfiber ile güçlendirilmiş plastic
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
AC	: Sıkışma indisi
E_k	: Kinetik enerji
ρ	: Havanın yağunluğu
φ	: Görünür rüzgar açısı
V	: Rüzgar hızı
A	: Rotor süpürme alanı
p	: birim zamanda havanın oluşturduğu basınç
P_{max}	: Maksimum teorik türbin gücü
α	: Hücum açısı
c	: Veter uzunluğu
L	: Kaldırma kuvveti
D	: İtme kuvveti
C_d	: İtme katsayısı
C_l	: Kaldırma katsayısı
λ	: Kanat uç hız oranı
V_a	: Görünür rüzgar hızı
r	: Rotor radial mesafesi
R_r	: Rotor yarıçapı
U_∞	: Serbest akan rüzgar hızı

B	: Rotor kanat sayısı
Ω	: Rotor açısal hızı
C_p	: Güç katsayısı
A'	: Rotor kanatlarının kapladığı alan
P_f	: Faydalı güç
η_t	: Sistemin toplam verimi
P_r	: Rüzgarın gücü
P_T	: Türbin Gücü
V_2	: Türbin içindeki rüzgar hızı
V_3	: Türbin çıkışındaki rüzgar hızı
n	: Yavaşlatma faktörü
λ_A	: Dizayn devirlilik sayısı
V_ξ	: Çevresel hız
ε	: Kayma sayısı
C_A	: Kaldırma kuvveti katsayısı
C_W	: Direnç kuvveti katsayısı
z	: Kanat sayısı
$\zeta_{uç}$: Uç kayıpları
Δt	: Rüzgarın turbine etkime süresi
α_b	: Kanat bağlama açısı
R	: Kanat boyu
L_ξ	: Rotorun çevresi
S	: Emniyet katsayısı
d_R	: Rotor mil çapı
W_d	: Direnç momenti
W	: Mukavemet momenti
D	: Rotor çapı

n_R	: Rotor devri
η_t	: Maksimum türbin devri
M_d	: Burulma momenti
M_e	: Eğilme momenti
m_R	: Rotorun toplam ağırlığı
L_1	: Rotor merkezi ile yatak merkezi arasındaki mesafe
M_b	: Birleşik moment

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dalga enerjisinin çalışma prensibi.....	10
Şekil 2.2.	Rüzgar enerjisinin kullanıldığı yerler.....	15
Şekil 2.3.	Türkiye rüzgar enerjisinin yıllara göre değişimi.....	20
Şekil 2.4.	İşletmedeki RES' lerin bölgelere göre dağılımı.....	20
Şekil 3.1.	Rüzgar türbini iç yapısı	27
Şekil 3.2.	Kule Tipleri.....	29
Şekil 3.3.	Rüzgar türbini basit şeması.....	30
Şekil 3.4.	Düşey eksenli bir rüzgar türbini.....	31
Şekil 3.5.	Yatay eksenli bir rüzgar türbini.....	32
Şekil 3.6.	Üç kanatlı rüzgar türbini.....	34
Şekil 3.7.	Stall kontrollü türbine ait güç eğrisi.....	36
Şekil 3.8.	Pitch kontrollü türbine ait güç eğrisi.....	37
Şekil 3.9.	Aktif stall ve aktif pitch kontrolü için pala dönüş yönleri.....	38
Şekil 3.10.	Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinlerde güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarının kıyaslaması.....	38
Şekil 4.1.	Rüzgar – kanat profili ilişkisi.....	43
Şekil 4.2.	Bazı rüzgar türbini naca kanat profilleri.....	47
Şekil 4.3.	NACA 4415 Profili $C_l - \alpha$ Eğrisi.....	48
Şekil 4.4.	NACA 4415 Profili $C_d - C_l$ Eğrisi.....	48
Şekil 4.5.	Rüzgar türbini pervanesinde gücün hıza bağlı değişimi.....	50
Şekil 4.6.	Rüzgar türbini pervanesinde aerodinamik verimin uç hız oranına bağlı değişimi.....	51
Şekil 4.7.	Uç hız oranı – kanat sayısı ilişkisi.....	51
Şekil 4.8.	Yavaşlatma faktörü değişimi.....	55
Şekil 4.9.	$C_{pschmitz} - \lambda_A$ eğrisi.....	58
Şekil 5.1.	Kanat bağlantı elemanları.....	63

Şekil 5.2.	Rotor mili bağlantı şeması.....	64
Şekil 5.3.	Rotor milini etkileyen kuvvetlerin oluşturduğu momentler.....	65
Şekil 5.4.	Burulma, eğilme ve birleşik moment	66
Şekil 5.5.	NACA 4415 profili	68
Şekil 5.6.	Rotor ve kanat kesit düzlemi.....	68
Şekil 5.7.	Modellenen kanat.....	70
Şekil 5.8.	Tasarlanan ve imal edilen kanat yarıları.....	70
Şekil 5.9.	Hazırlanan bir model kütüğü.....	71
Şekil 5.10.	Kanat 1. yarısının işlenmesi	72
Şekil 5.11.	Kanat 2. yarısının işlenmesi	72
Şekil 5.12.	İmal edilen poliester kalıp yarısı.....	73
Şekil 5.13.	Model üzerine jelkot uygulanması.....	74
Şekil 5.14.	Model, üretilen kanat ve kalıp yarıları	74
Şekil 5.15.	Jeneratör motorunun tahrik edilmesi	78
Şekil 5.16.	Tasarlanan dişli kutusu.....	79
Şekil 5.17.	Üretimi yapılan dişli kutusu.....	79
Şekil 5.18.	Çelik boru zemin bağlantısı.....	80
Şekil 5.19.	Çelik boru zemin ankrajı.....	80
Şekil 5.20.	Mekanik fren şematik görünümü.....	81
Şekil 5.21.	Kullanılan mekanik fren düzeneği.....	82
Şekil 5.22.	Yönlendirici.....	82
Şekil 5.23.	Kablo sarımını engellemek amacı ile kullanılan fırça sistemi.....	83
Şekil 5.24.	Tasarımı yapılan türbin gövdesi.....	84
Şekil 5.25.	İmal edilen türbin gövdesi.....	84
Şekil 5.26.	Porye ve fırça sistemi.....	85
Şekil 5.27.	Montaj edilmiş türbin gövdesi.....	86
Şekil 5.28.	Rüzgar türbininin ankraj zeminine taşınması.....	86
Şekil 5.29.	Sistemin ankraj zeminine montaj edilmesi.....	87
Şekil 5.30.	Montaj işlemi tamamlanan türbin.....	88
Şekil 5.31.	Rüzgar türbini tasarım ve imalat algoritması.....	91

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Güneş enerjisinin avantajları ve dezavantajları.....	9
Tablo 2.2.	Rüzgar enerjisinin avantajları ve dezavantajları.....	12
Tablo 2.3.	Beaufort cetveli kara kriterleri.....	16
Tablo 2.4.	Beaufort cetveli deniz kriterleri.....	17
Tablo 2.5.	Türkiye’de işletmedeki rüzgar elektrik santral projeleri.....	21
Tablo 2.6.	İnşaatı devam eden kapasite.....	22
Tablo 2.7.	Global rüzgar enerjisi pazarındaki ilk on ülke.....	23
Tablo 2.8.	Enerji üretimin için kaynak elde edilebilirliği, maliyet ve ömür açısından kıyaslanması.....	24
Tablo 2.9.	Enerji üretim sistemlerinin çevresel etkileri açısından kıyaslanması.....	25
Tablo 4.1.	Türbinlerde kullanılan bazı naca profillerinin özellikleri.....	47
Tablo 5.1.	Bir evin aylık bazda enerji tüketimi.....	61
Tablo 5.2.	Naca 4415 profili kanat değerleri.....	68
Tablo 5.3.	Kanat hesaplamaları sonucunda bulunan bağlama açıları ve giriş boyları.....	69
Tablo 5.4.	Kanat sayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki.....	75

ÖZET

Anahtar kelimeler: Rüzgar Türbini, Tasarım, İmalat

Rüzgar enerjisi geçmiş yıllardan günümüze farklı alanlarda kullanılmıştır. Su pompalama, tarımcılıkta, deniz ulaşımında kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde özellikle elektrik enerjisinin üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. Bunun en önemli sebeplerinden biri enerji geleneksel enerji üretim tesislerinin çevreye verdiği zarar ve hammadde girdisinin azalmaya başlamasıdır. Bu gelişmeler paralelinde alternatif enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi temiz, kaliteli ve sürekli olduğundan önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada elektrik üretim amaçlı rüzgar türbin tasarımı yapılmış ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Tasarım öncesinde gerekli hesaplamalar yapılmış ve sistemin tasarlanmasında CAD programı olarak Mechanical Desktop programı kullanılmıştır. Tasarım aşamasının ardından imalat detayları çıkarılmış ve rüzgar türbini imal edilerek montaj edilmiştir. Tezin birinci bölümünde rüzgar enerjisinin tanımı yapılmış, rüzgar enerjisi hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. İkinci bölümde, yenilenebilir enerji kaynakları açıklanmış, rüzgar hakkında bilgiler verilmiş ve rüzgar çeşitleri üzerinde durulmuştur. Dünyanın ve Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde rüzgar türbinlerinin iç yapıları, çeşitleri ve türbin kontrol sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar ve kanatların aerodinamik yapısı hakkında bilgiler verilmiş ve rüzgar enerjisi ile ilgili denklemler ifade edilmiştir. Beşinci bölümde rüzgar türbini tasarımı için gerekli hesaplamalar yapılmış ve tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen türbinin imalat safhaları detaylandırılarak anlatılmıştır.

DESING AND DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE

SUMMARY

Key Words: Wind Turbine, Design, Manufacturing

Wind energy is used in different areas since the previous years. Water pumping, of agriculture, maritime transport of electrical energy used today, especially for the production of wind energy has been used. One of the most important reasons for this is environmental damage caused by conventional energy production facilities and raw material input energy starts to decrease. Alternative sources of energy in parallel with these developments come to the fore. These sources include wind energy, clean, high quality, and that has an important place continuously.

This study has been designed and studied to develop wind turbine for electricity generation. The necessary design calculations made prior to the design of the system Mechanical Desktop software has been used as a CAD program. After the design phase of the manufacturing details have been issued and wind turbine assembly is manufactured. In the first part of this thesis has been the definition of wind energy, wind energy studies were about. In the second chapter, described in renewable energy sources, wind and wind information is given about the types discussed. Provides information about the wind energy potential of Turkey and the world. In the third chapter the internal structures of wind turbines, types and turbine control systems are given. In the fourth chapter the wings and the wings are used in wind turbines and wind energy are given information about the structure of aerodynamic equations are expressed. In the fifth chapter the calculations required for the design of wind turbine and the design was made. Design of manufacturing the turbine stages are described in details.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde dünya ekonomisinde söz sahibi ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli yatırımlar yapmakta ve kullanımını arttırmak için büyük çaba sarf etmektedirler. Bunun nedeni dünyanın enerji ihtiyacının gün geçtikçe artmasıdır. Dünya üzerinde önemli bir yere sahip olan enerji kaynaklarından petrolün sınırlı olması ve çevre etkileri göz önüne alındığında alternatif enerji kaynakları çok daha cazip bir seçenek olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli özelliği çevreyi kirletmemesi ve ömrünün uzun olmasıdır.

Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri arttıkça enerji tüketim miktarlarına artmaktadır. Ülkemizin son yıllardaki endüstrileşme seviyesindeki gelişmesi dikkate aldığımızda, kişi başına elektrik tüketiminin 2-3 kat artmaların olduğu belirtilmektedir. Gerekli ve fosil kökenli enerji kaynaklarının sınırlı olduğu dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Rüzgarlar açısından önemli bir potansiyele sahip olan ülkemizde, rüzgar enerjisinin başka enerji formlarına dönüştürülmesi önemli bir enerji kaynağını oluşturmaktadır.

Bilindiği üzere dünyadaki enerji kaynaklarının tamamı güneş tarafından oluşturulmaktadır. Rüzgâr; güneş enerjisinin yeryüzüne ulaşması sonucunda ortaya çıkan bir doğa kuvvetidir. Yeryüzünde oluşan sıcaklık farkı, basınç değişimlerini meydana getirmektedir. Bu değişimler sonucu da rüzgâr meydana gelir. Yüksek basınç ile alçak basıncın yer değiştirmesine rüzgâr denir. Günümüzde rüzgâr enerjisi teknolojisi hızla gelişmektedir. Geleneksel enerji üretim maliyetleri rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin maliyetleri ile rekabet edebilir düzeye gelmiştir. Rüzgar enerjisine artan bu eğilim, özellikle enerji üzerine çalışma yapan arge firmaları ve araştırmacıların ilgi alanı haline gelmiştir. Yapılan araştırmalarda, genellikle rüzgarın ülkedeki enerjiye dönüştürülebilir potansiyelleri,

sağlayabileceği faydalar, maliyet analizi ve en önemlisi de rüzgar türbini veriminin kanatçık tasarımı ve malzeme tekniğiyle arttırılması üzerinedir.

Karadağ, yaptığı çalışmada, enerji çevre ilişkisine kapsamlı bir şekilde yer vermiştir. Rüzgar enerjisinin ülkemiz için uygun bir kaynak olduğunu saptamış ve yeni teknolojilerden bahsetmiştir. Bir üretim tesisinin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek şekilde rüzgar türbini tasarımı yapılmış, maliyetler incelenmiş ve geri dönüşüm zamanını hesaplamıştır. Rüzgar ile kanat ilişkisini incelemiş SymLab programında kanat tasarımı yapmıştır. Bilgisayar ortamında, geliştirdiği kanat ile farklı bölgelerde sağlanabilecek yararlar üzerinde durmuştur (Karadağ 2009).

Şen, yaptığı çalışmada, rüzgar enerjisinin temel kriterlerinden yola çıkarak Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacının rüzgar enerjisi ile karşılanması konusunda genel prensipleri araştırmış ve De Wind firmasının ürettiği türbinler arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Gökçeada için bir rüzgar enerjisi santrali tasarımı yapmış ve tasarımı gerçekleştirirken, Gökçeada'nın elektrik enerjisi ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için türbin sayısı, bunların ürettikleri enerji miktarlarını hesaplamıştır. Türbinlerin enerji ihtiyacını karşılama oranı, kapasite faktörleri bulunmuştur. Tasarımı yapılan santralin maliyet analizi ve geri ödeme süresini hesaplamıştır (Şen, 2003).

Ergür, yaptığı çalışmada, rüzgar türbinlerinin tarihçesini, rüzgar enerjisinin dünyada ve Türkiye'de ki kullanımlarından bahsetmiş, rüzgar enerjisinin oluşumu, türleri, weibull dağılımı ve rüzgar enerjisinden elde edilebilecek elektrik gücünün hesabını incelemiştir. Tezde, rüzgar türbinlerinin iç yapıları, senkron ve asenkron jeneratörler üzerinde durulmuştur. PSCAD simülasyon programıyla sabit ve değişken hızlar için türbin simülasyonu yapmıştır (Ergür, 2006).

Özaktürk, yaptığı çalışmada, rüzgâr enerjisinin dünya ve ülkemiz genelindeki durumu anlatılmış, rüzgârın tanımı yapılarak rüzgâr türbinleri hakkında detaylı bilgiler vermiştir. Rüzgâr santrallerinin iletim ve dağıtım sistemine olan etkileri, üretilen enerjinin kalitesi, rüzgâr enerjisinin avantajları-dezavantajları anlatılmış. Ve rüzgâr enerjisi projelerinin gerçekleştirilmesinde yer tespiti, maliyet, rüzgâr analizi

verileri ve teşvikler gibi dikkat edilmesi gereken hususları ele almıştır (Özaktürk, 2007).

Emniyetli, yaptığı çalışmada, kanat profili aerodinamik tasarımında önce rotorun genel yapısı üzerinde durmuş ve üç kanatlı bir türbin tasarımı yapmıştır. Türbinin tasarım uç hız oranı 6 olarak belirmiş, kanat profili olarak Delft University tarafından geliştirilen DU profillerini kullanmıştır. Bu özelliklere sahip ideal pala tasarlandıktan sonra geometride düzeltme yapmıştır. Tasarımı yapılan türbinin güç eğrisi ve güç kontrolü için gerekli pala döndürme açılarını belirlemiştir. Türbin geometrisi aynı kalmak kaydıyla nominal hıza ulaştığında uç hız oranı 6 değil 5 olacak şekilde çalışırsa elde edilecek yeni rotor çapı ve güç eğrisi belirlemiştir. Yeni çalışma biçimiyle rotorun çapı 37,5 metreden 44,8 metreye, Bandırma'da pürüzlülük sınıfı 1 olan bölgedeki kapasite faktörü de %25'9 dan %31,8'e yükseldiğini tespit etmiştir. Türbinin devir sayısında yapılan bu değişiklik ile enerji üretiminde %23 gibi önemli bir artış sağlanabileceği belirtilmektedir (Emniyetli, 2007).

Çolak, yaptığı çalışmada, model bir rüzgar türbini tasarımı yapmış ve bu türbine ait performans değerlerini incelemiştir. Rüzgar türbinlerinin aerodinamik ve mekanik karakteristiğini incelemiş ve bu bilgileri model türbinde uygulamıştır. Elde edilen deneysel verileri incelenen türbin karakteristiği ile pekiştirmiştir (Çolak, 2000).

Önder, yaptığı çalışmada, aerodinamik esaslar ve kanat elemanı tasarım esasları ışığında istenilen bölge ya da rüzgâr koşullarına bağlı olarak yatay eksenli rüzgâr türbinleri için pratik ve görsellik taşıyan bir kanat tasarımı programı geliştirilmesini amaçlamıştır. Söz konusu program ile konuya ilgi duyabilecek kullanıcılara yeterli bilgi sunup kolay hesaplama ve karşılaştırma yapabilecekleri bir alt yapı oluşturulmasını hedeflemiştir. Çalışmada, rüzgar hızı sabit tutulmuştur. Kanat elemanı tasarımı hesaplamalarında momentum teorisi ve kanat elemanı teorisini kullanmış ve bu teorilerin birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamıştır (Önder, 2006).

Yukarıda rüzgar enerjisi üzerine yapılan bazı çalışmalar verilmiştir. Çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, daha çok bilgisayar ortamında rüzgar türbini tasarımı,

kanat profili ve ülkemizde bazı yerlerde olan rüzgar potansiyellerinin üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada, rüzgar enerjisi kullanılarak elektrik üretim amaçlı rüzgar türbin tasarımı ve dizaynı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla rüzgar türbini hesaplamaları gerçekleştirilmiş, bilgisayar ortamında modellenmesi ve imalatı yapılmıştır. İmalatı tamamlanan rüzgar türbini gerekli alt yapı işlemleri gerçekleştirildikten sonra 6 metre çelik boru üzerine montaj edilmiştir.

BÖLÜM 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

2.1. Enerji

Teknolojik gelişmeler ve dünya nüfusu artan bir ivme ile gelişmektedir. Bu gelişmelere paralel olarak enerji ihtiyacı artmaktadır. Bunun yanında yaşantımızın vazgeçilmezi haline gelen enerji, üretilmesi, taşınması ve tüketimi esnasında çevre kirliliğine yol açmaktadır.

Enerji türlerinin tamamında, elde edilmesinden son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar geçtiği tüm aşamalarda havaya, suya, yaşayan canlılara ya da yok edilmesi sorun olan atıklarıyla çevreye zarar verir. Hidrolik enerji, nehirlere barajlar kurulmasına, barajlar da nehir kıyısında yaşayan insan topluluklarının başka yerlere göç etmesine ve nehir ekosisteminin çökmesine sebep olur. Rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri habitatların etkilenmesi ve doğal peyzaj bütünlüğünün bozulması anlamına gelir. Biokütle enerjisi temini için kullanılan bitkilerin yetiştirileceği tarlalar, belirli doğal alanların tarım alanına dönüştürülmesine sebep olur. Fosil yakıtların yerini nükleer enerjinin alması, hem nükleer kaza kaygısı, hem de radyoaktif atıkların güvenli biçimde depolanamaması yüzünden olanaksız görünür (Karadağ, 2009).

Artan dünya nüfusu ve teknolojinin gelişmesi enerji ihtiyacını artırmaktadır. Büyük ölçekli enerji üretim tesisleri ekolojik dengeyi tehdit etmektedir. Enerji üretim tesislerinin bu tehdidi ulusal sınırların ötesine geçmektedir. Bu nedenle çevre sorunları dünyanın karşı karşıya kaldığı bir sorun olmaktadır. Bu sebeple ülkelerin bu tehdide karşı ortak hareket etmeleri gelecekte yaşanacak çevre sorunları için büyük önem taşımaktadır.

Türkiye brüt elektrik enerjisi tüketimi 2008 yılında 198,1 milyar Kwh olarak gerçekleşirken 2009 yılında bir önceki yıla göre %2,42 azalarak 193,3 milyar Kwh,

elektrik üretimimiz ise bir önceki yıla göre (198,4 milyar Kwh) %2,02 azalarak 194,1 milyar Kwh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik tüketiminin 2020 yılında yüksek senaryoya göre yıllık yaklaşık %8 artışla 499 TWh' e, düşük senaryoya göre ise yıllık ortalama %6,1 artışla 406 TWh' e ulaşması beklenmektedir. Temmuz 2010 tarihi itibari ile sisteme 1479 MW' lık yeni santral eklenmiş olup kurulu gücümüz 46.126 MW seviyelerine ulaşmıştır. 2009 yılında elektrik üretimimizin, %48,6'sı doğal gazdan, %28,3'ü kömürden, %18,5'i hidrolikten, %3,4'ü sıvı yakıtlardan ve %1,1'i yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiştir.

2009 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin kurulu gücü içerisinde EÜAŞ %54,2, üretim şirketleri %16,4, yap-işlet santralleri %13,7, otoprodüktörler %8,1, yap-işlet-devret santralleri %5,5, işletme hakkı devredilen santraller %1,5 ve mobil santraller %0,6'lık paya sahiptir.

Elektrik piyasasının serbestleştirilmesi hedefi doğrultusunda, 4628 sayılı Kanunla yeni üretim yatırımlarının özel sektör tarafından yapılması öngörülmüştür. 2002-2009 döneminde ülkemizin elektrik üretimi kurulu güç kapasitesi 31.750 MW'den 44.600 MW düzeyine ulaşmıştır. Bu dönemde devreye giren 12.850 MW ilave kapasitenin yaklaşık 7000 MW'lık bölümü özel sektör tarafından yapılan santrallerden oluşmaktadır. 2009 yılında sisteme toplam 3.022 MW'lık yeni santral eklenmiş olup, devreye giren ilave kapasitenin 2.810 MW'lık kısmı özel sektör tarafından yapılan santrallerden oluşmaktadır. Elektrik sektöründe rekabeti esas alan şeffaf bir piyasanın oluşturulması ve bu suretle yatırım ortamının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. 2010 yılında toplam 1479 MW kurulu gücünde özel sektöre ait 64 adet üretim santralının geçici kabulleri yapılmış ve işletmeye alma izni verilmiştir. İşletmeye alınan tesislerin;

- 2'si (17 MW) jeotermal enerji,
- 13'ü (330 MW) rüzgâr enerjisi,
- 29'u (486 MW) hidrolik enerji,
- 2'si (7 MW) çöp gazı ve biyogaz enerjisi,
- 18'si (639 MW) termik santrallerdir (Enerji-a, 2012).

Yenilenebilir enerji kaynakları yenilenemeyen enerji kaynaklarına kıyasla süreklidir ve dünya yüzeyinde hemen hemen her yerde olmasından dolayı büyük önem taşımaktadır. Yenilenemeyen enerji kaynakları ise enerji üretim girdisi olan hammaddeye bağımlı olunması, ithalat harcamaları ve enerji eldesi sonunda ortaya çıkan ekolojik dengeyi bozucu etkilere sahiptir. Bu sebeple, yenilenemeyen enerji kaynakları, sınırlı bir rezervin olması alternatif enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Alternatif enerji kaynaklarının çevresel etkileri yenilenemeyen enerji kaynaklarına oranla çok daha azdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, mevcut teknik ve ekonomik sorunların çözümlenmesi halinde 21. yüzyılda en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir. Geçmişten günümüze kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarına aşağıda özetlenmiştir (Karadağ, 2009).

2.2. Odun

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak, önemli potansiyele sahip olmakla birlikte, tüketimi o derece hızlıdır ki yenilenebilme kapasitesi oldukça düşmüştür. Gelişmiş ülkelerde ise odunun yakıt ve enerji kaynağı olarak değil, sanayi girdisi olarak değerlendirilmesi esas alınmıştır. Ayrıca sanayi hammaddesi olarak kullanılması halinde ise yararı çok daha yüksek olmaktadır. Fakat odun, en verimsiz şekilde yakıt olarak yaygın kullanılmaktadır.

2.3. Hidrolik Güç

Yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrolik gücün dünyada her yıl üretimi artmaktadır. Bugün hidrolik güçten oldukça yararlanılmasına rağmen, kullanılmayan potansiyel yine de çok olmaktadır. Hidrolik barajların ayrıca, büyük toprak alanlarını sular altında bırakması, ekolojik yapıda bitki ve hayvan türlerini değiştirmede de dolaylı etkisi olmaktadır.

İşletme masrafları çok düşük olan hidroelektrik enerji santralleri ülkemizde önemli bir potansiyele sahip olmasına karşın elektrik üretimi için daha çok doğalgaz kullanılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir konu da özellikle büyük hidroelektrik santrallerin ekolojik ve sosyoekonomik dengede oluşturduğu çevresel etki

değerlendirmesi yapılarak belirlenecek olumsuz etkilerini azaltacak tedbirler alınmasıdır (Şen, 2003).

2.4. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden daha fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, güneş enerjisi çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir (3de3enerji, 2012).

Günümüzde ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında güneş enerjisini kullanmak, maliyet ve çevre kirlenmesine sebep olmayan alternatif enerji kaynaklarından biridir. Bir enerji kaynağı değerlendirilirken işletmecilik açısından birkaç tane temel faktör vardır ki göz ardı edilemez. Bunlar ekonomik oluşu, çevre sorunları yaratıp yaratmayacağı ve güvenlik sorunlarıdır. güneş enerjisinde bu üç ana sorundan son ikisi yoktur. güneş enerjisinin sadece maliyet sorunu vardır ve o diğerlerinden fazla pahalı değildir. Güneş enerjisi sistemlerinin maliyet ve verimliliklerinin, ülkenin coğrafi konumuna çok bağlı olduğu bir gerçektir. Bu açıdan bilimsel değerlendirmelerde maliyet fazla bile olsa, insanoğlunun bu temiz enerjiye yönelmesinin uygun olacağı şeklinde görüşler vardır (Aygün, 1989).

Güneş enerjisi, kollektörler ve ısı pompaları yardımıyla ısı enerjisine, güneş pilleri yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Şimdilik güneş pilleri, elektrik şebekesinin olmadığı yangın söndürme kulelerinde, radyolink, TV ve cep telefonu baz istasyonu aktarıcılarında, deniz fenerlerinde vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de güneş enerjisi, daha çok termal ısıtma amacıyla kullanılır (Şen, 2003). Güneş enerjisinin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Güneş Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları (Karadağ, 2009)

AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Doğrudan güneş enerjisini kullanır.	
Doğal ısıtma ve soğutma sistemleri kullanarak binaların gereksiz ve aşırı ticari enerji tüketimlerini önler,	
Çevre değerlerini korur, çevreye verilen zararları en aza indirir,	Kazasal risk olarak ısı taşıyıcı sıvı kaçağı gösterilebilir. Bu durumda su kirliliği olabilir.
Doğal ve sağlığa zararsız malzemeler kullanır	güneş enerjisi sistemleri ortalama 3 yılda bir değişmesi gereken soğutma sıvısı içerirler. Bu sıvılar sistemin zarar görmesini önleyen antipas, donmasını önleyen antifriz gibi zehirli maddeler içerirler. Isı taşıyıcı sıvılar aynı zamanda nitriler, nitratlar, sülfidler, sülfatlar, kromatlar içerir. Sıcaklık arttıkça yağlar, aromatik alkoller, CFC'ler gibi daha kompleks katkıları içerir. büyük ölçekli sistemlerde boşaltım ve yenileme sırasında kontrol iyi yapılmalıdır.
Günden güne daha ekonomik hale gelmektedir.	Yörenin güneş alma kapasitesine bağlıdır. Her yerde ekonomik olmayabilir.
Dışa bağımlı değildir.	

2.5. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji gün geçtikçe daha cazip bir kaynak olmaktadır. Elektrik, sıcak su, buhar yada gaz kütlelerinin uygun sıcaklık şartlarında üretilmektedir. Dünyada toplam elektrik kurulu gücü 8274 MW'a, ülkemizde ise 20.4 MW'tır.

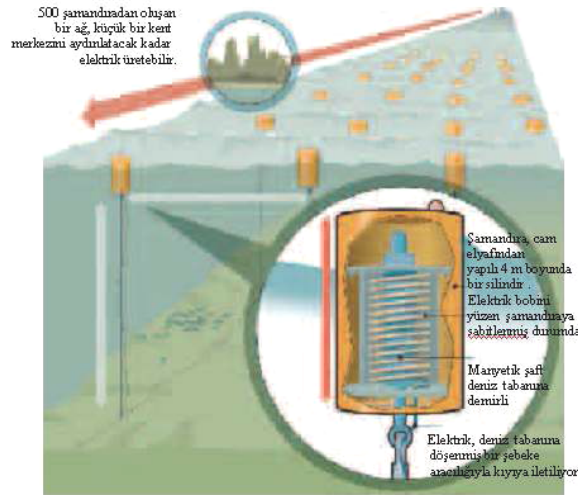
Türkiye, jeotermal enerji yönünden şanslı ülkeler arasında yer almaktadır. Sıcaklığı yer yer 100⁰ C'ye varan 600'den fazla sıcak su kaynağının varlığı, Türkiye'nin önemli bir jeotermal enerji potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Ölçülen en yüksek rezervuar sıcaklığı 230⁰ C ile Germencik'tedir. Bu sahalarda sondaja dayalı elektrik üretimine uygun potansiyel 200 MW dolayındadır. Bu potansiyele rağmen, ülke genelindeki tek santral, Denizli-Kızıldere' de olup, 20 MW kurulu güce sahiptir. Bu santralin verimi ise, teknik nedenlerden dolayı %75 civarındadır (Şen, 2003)

2.6. Biokütle Enerjisi

Son yıllarda biyomas enerjisi yardımıyla yani hayvansal, bitkisel atıkların ve çöplerin değerlendirilmesi sonucunda elektrik enerjisi elde edilmesi, dünyanın birçok ülkesinde yaygın hale gelmektedir. Çağdaş ve klasik olmak üzere, iki grupta incelenir. Klasik yöntemde, ormanlardan elde edilen odun, bitki, hayvan atıkları yakacak olarak kullanılır. Çağdaş yöntemde ise, ağaç endüstrisi, enerji tarımı, hayvansal atıklar ve kentsel atıklar kullanılır. Çöplerin depolanması sonucunda elde edilen ve “landfill” gaz olarak adlandırılan çöp gazı, %60 oranında metan ihtiva eden önemli bir enerji kaynağıdır (Şen, 2003).

2.7. Deniz Enerjisi

Deniz enerjileri deniz dalga, boğaz akıntıları, med-cezir ve deniz sıcaklık gradyenti gibi çeşitlidir. Türkiye’de bunlardan sadece deniz dalga ve boğaz akıntıları olanakları vardır. Bu alanda yapılan çalışmaları incelediğimizde özellikle dalga enerjisi alanında yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir.



Şekil 2.1. Dalga Enerjisinin Çalışma Prensibi (Bilim ve Teknik Dergisi, 2005)

Sabit mıknatıs doğrusal jeneratör şamandırası, deniz yüzeyinden yaklaşık 30 metre aşağıya bağlanmış 4 metre uzunluğundaki bir mil üzerine yerleştirilmiş güçlü mıknatıslar dizisinden oluşan bir sistem. Mili çevreleyen bakır bobin, dalgalarla birlikte yukarı ve aşağı doğru hareket eden poliester bir şamandıra içinde duruyor.

Hareketli bobin, milin manyetik alanı içinde gidip gelerek bir elektrik akımı oluşturuyor. Su gücüyle ya da hava basıncıyla çalışan pompalara dayalı eski düzeneklerin tersine bu şamandıra, %90 düzeyinde verimlilik oranına erişebiliyor. Şamandıraların genel elektrik şebekesine bağlanarak 5 yıl içinde evlere ve iş yerlerine güç sağlayabileceği düşünülüyor. Dalga enerjisinin rüzgar gibi diğer yenilenebilir enerji türlerine göre sahip olduğu belirgin üstünlükler var. Dalgaları önceden tahmin etmek rüzgara göre çok daha kolay. Üstelik rüzgardan 50 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahipler. Bir şamandıra ağından gelen düzensiz alternatif akım voltajı, elektrik tellerinin birleştiği bir bağlantı kutusuna bağlanıp doğru akıma dönüştürülerek yaklaşık 12.000 volta yükseltilebilir ve daha sonra kıyıya gönderilerek bir güç istasyonunda yeniden AC'ye dönüştürülebilir (Windenergy, 2012).

2.8. Hidrojen Enerjisi

Fosil kökenli yakıtların teknolojisinin gelişmesi ve aşırı kullanım sonucu hızla tükenmesi, araştırmacıları alternatif yakıt arayışına itmiştir. Sudan elde edilebilirliği sayesinde sonsuz bir enerji kaynağı olan hidrojen günümüz teknolojisi ile motorlu taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilme sınırına gelmiştir. Hidrojenin çevre dostu olması ve geleneksel yakıtlara göre avantajlarının bulunması, yakın gelecekte en gözde enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır. Bir takım işletim problemleri bulunsa da yapılacak çalışmalarla bu problemler giderilebilir.

Çevre kirliliğine sebep olan önemli etkenlerden birisi de içten yanmalı motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarıdır. Fosil kaynaklı yakıtların aşırı kullanımı sonucu azalması ve artan çevre kirliliği, çevre bilincine uygun ve yenilenebilir alternatif yakıtların araştırılmasını gündeme getirmiştir. Araştırılacak alternatif yakıtın içten yanmalı motorun performansını fazla düşürmemesi ve egzoz emisyonlarını olumlu yönde etkilemesi gerekmektedir. Ayrıca bu yakıtın elde edilebilirliği, maliyetinin düşük olması, kullanılabilirliği, bulunabilirliği ve motorda fazla değişiklik gerektirmeden kullanılması da önem taşımaktadır. Yüksek verim, çevre sorunları ve fosil yakıt rezervlerinin azalması gibi sorunlar 21.yy enerji tercihinin elektrik ve hidrojenden yana olması sonucunu doğurmaktadır. Bu iki alternatif yakıt birbirine

dönüştürülebilmektedir. Ayrıca hidrojen elektrikten daha iyi depolanabilmekte ve uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu özelliği hidrojenin uçaklar ve motorlu taşıtlar içinde yakıt olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır (Obitet, 2011).

2.9. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi çok eskiden beri bilinmesine rağmen halen çok az kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle Kaliforniya ve İskandinavya’da yerel elektriğin rüzgar türbinleri ile üretilmesi uygulamaları yaygınlaşmıştır. Ülkemizde ağırlıklı olarak Ege ve Marmara olmak üzere çeşitli bölgelerde yer alan 7 ölçüm istasyonu tamamlanmış ve halen 14 ölçüm istasyonda ölçüm çalışmaları sürdürülmektedir. Meteorolojik çalışmalar neticesinde ülkemizin rüzgar enerjisi bakımından zengin olduğu belirlenmiştir. 1999 yılında toplam 23.7 milyon kilowat-saat elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmiştir. Rüzgar enerjisinin en önemli sorunu ses seviyesinin yüksek oluşudur. Tablo2.2’ de rüzgar enerjisinin avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Rüzgar Enerjisinin Avantajları ve Dezavantajları (Enerji, 2012)

AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Kararlı, güvenilir, sürekli bir kaynaktır.	Türbin için geniş alanlar isteyebilirler. Tek bir türbin için 700-1000 m ² /MW. Rüzgar tarlalarının birim güç başına toplam gereksinimi ise 150-200 katı kadardır. Türbinlerin kapladığı alan bunun %1-1.2 kadar olduğundan bu alanlar yinede tarım amaçlı kullanılabilir.
Dışa bağımlı değildir.	Görsel ve estetik olarak olumsuzdur. Gürültüdürlür ve kus ölümlerine neden olur, radyo ve TV alıcılarında parazitlenme yaparlar Bu nedenle İngiltere basta olmak üzere bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır.
Gelişen teknoloji ile birlikte enerji birim maliyetleri düşmektedir.	Denizlerde kurulan “offshore” Ruzgar türbinleri kıyı balıkçılığına zarar verebilir.

Rüzgar enerjisi temiz bir enerji kaynağı olmasına karşın olumsuz çevre etkileri vardır. Başta rüzgar türbinlerinin görsel ve estetik etkisi bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Uzak bölgelerden bile dikkat çekmektedir. Hoş olmayan bir görüntü oluşmaktadır. Bunun yanında yakın çevreyi rahatsız eden aşırı gürültüye neden olur. Kus ölümlerine neden olduğu bilinmektedir. Haberleşme de parazitlere neden olur. 3 km çaplı alan içerisinde radyo ve TV alıcılarını karıştırdığı bu gün bilinen bir hal almıştır (Ultanır, 1996).

Rüzgar çiftliklerinin yerleşim yeri dışına kurulmaları gerekmektedir. Bir yerleşim bölgesiyle Rüzgar çiftliği arasındaki mesafe en az 400 m olmalıdır. Bu koşuldan sonra taban gürültüye 5 dB kadar gürültü eklenmektedir. Bir rüzgar çiftliğindeki gürültü 85 dB'e kadar olabilmektedir. Türbinden 400 m sonra 37 dB'lik gürültü uygun görülmektedir. Ancak, bu uzaklıkta 56 dB'lik bir gürültü olduğu kaydedilmiştir. Toplum sağlığı açısından rüzgar enerjisi 0,2-0,6 PDL3/MW. yıl parametresi ile değerlendirilir. PDL, çevrede yaşayanlar için kayıp gün sayısıdır. Hastalık tipi kazalar ise WDL parametresi ile ölçülmekte olup, WDL işgücü kaybını göstermektedir. Rüzgar enerjisi için 0,4-10 WDL/MW. yıl kadardır. Ayrıca istatistiklere göre yılda 1000 MW başına 3 kaza olabilmektedir (Ultanır, 1996).

Rüzgâr türbinlerinin çalışması çevreye zararlı gaz emisyonuna neden olmadığından enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahiptir.

2.9.1. Rüzgarın oluşumu

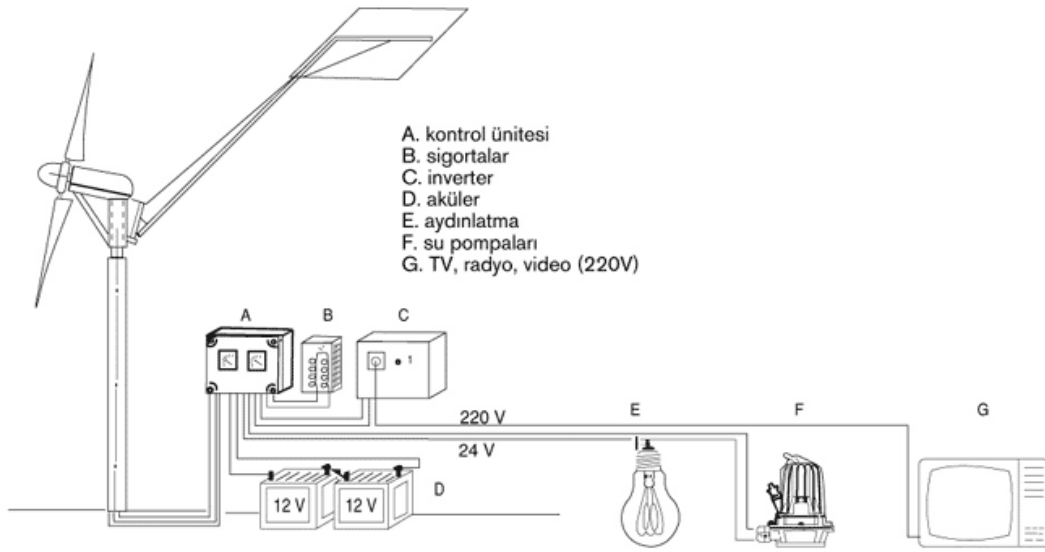
Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin çevrime uğramış şeklidir. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları, rüzgarları oluşturmaktadır. Rüzgar yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı hareketlerdir.

Ekvator bölgesi dünya'nın diğer yerlerine göre daha fazla ısınır. Bu bölgede ısınan hava yaklaşık 10km.'ye kadar yükselir, kuzeye ve güneye doğru yayılır. Eğer dünya dönmeseydi, ısınan hava Kuzey Kutbu'na ve Güney Kutbu'na vardıktan sonra

aşağıya doğru hareket eder ve ekvatora geri dönerdi. Dünya döndüğü için, kuzey yarımkürede her hareket saat yönüne, güney yarımkürede ise saat yönünün ters istikametine doğru yönelir (Şen, 2003).

Rüzgar atmosferde bol ve serbest olarak bulunan, kararlı, güvenilir ve sürekli bir kaynaktır. Doğası gereği kinetik enerji taşımaktadır. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerjinin miktarı rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgarın hızı yükseklikle, rüzgar gücü ise hızının küpü ile orantılı olarak artar. Sağlayabileceği enerji gücü, estiği süreye bağlıdır. Özgül rüzgar gücü, hava debisine dik olarak birim yüzeye düşen güçtür.

Yenilenebilir bir enerji türü olan rüzgâr, eski çağlardan beri kullanılmaktadır. Endüstriyel manada kullanımı ise araştırılmaya devam edilmektedir. Bu amaçla, hareketli havanın bünyesindeki kinetik enerji bir eksen etrafında dönen kanatlar vasıtasıyla mekanik enerji dönüştürülmek durumundadır. Temiz ve diğer enerji türlerine kolayca çevrilebilmeleri avantajları, zamana göre düzensiz ve yoğunluğunun az olması dezavantajlarıdır. Rüzgar enerjisinin elde edilişi ve nerelerde kullanıldığı veya hangi enerji türlerine dönüştürüldüğü Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Genelde, rüzgâr kinetiği bir mil üzerinde kanatlar vasıtasıyla dönel harekete çevrilir. Bu mil bir pompayı tahrik eder. Pompa da kuyudaki suyu daha yüksek bir depoya basar. Böylece depoda rüzgâr enerjisi suyun potansiyel enerjisi olarak çevrilmiş olur. Sulama veya kullanım amaçlı böyle bir sistem pompa veya kompresör gücünün tasarruf edilmesini sağlayacaktır. Diğer bir kullanım şeklide dönen mil ucuna bir dinamo veya jeneratör bağlayarak direkt AC veya DC formunda elektrik üretmektir. Üretilen elektrik bir akünün şarj işlemine kullanılarak depolanır. Akü ise ev araçları ve diğer cihazlar için elektrik kaynağı olacaktır. Hatta üretilen elektrik suyun elektroliz işlemine kullanılarak hidrojen üretiminde kullanılabilir. Üretilen hidrojen ise depolanır. Eğer dönen mil ucuna bir kompresör bağlanırsa bir tanka gaz basılabilir. Böylece enerji gaz üzerinde basınç potansiyeli şeklinde depolanmış olur (Obitet, 2011).



Şekil 2.2. Rüzgar Enerjisinin Kullanıldığı Yerler (Obitet, 2011)

2.9.2. Rüzgar çeşitleri

Rüzgar hızı ile sınıflandırma yapıldığında, kara ve deniz kriterleri karşımıza çıkmaktadır. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’ te rüzgar hızının belirtilen kriterlere göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Beaufort Cetveli Kara Kriterleri (Karadeniz, 2002)

KARA KRİTERLERİ			
Beau. Sayısı	Rüzgar Hızı (m/s)	Tanımı	Gözlenebilir Etkiler
0	0,0 - 0,4	Durgun	Duman dikey olarak yükselir.
1	0,4 - 0,8	Hafif	Duman yatay açı yapacak şekilde yükselir.
2	1,8 - 3,6	Hafif	Rüzgar tende hissedilir, yapraklar hafif hareketlidir.
3	3,6 - 5,8	Hafif	Yapraklar hareketlidir, bayrak hafif dalgalanır.
4	5,8 - 8,5	Orta	Küçük dalgalar hareketlidir, toz kalkar, kitap sayfaları uçuşur.
5	8,5 - 11	Orta	Küçük ağaçlar hareketlidir, rüzgar hissedilir.
6	11 - 14	Güçlü	Büyük dallar hareketlidir, telefon telleri öter.
7	14 - 17	Güçlü	Bütün ağaçlar hareketlidir.
8	17 - 21	Fırtına	İnce dallar kırılır, yürümek güçleşir.
9	21 - 25	Fırtına	Küçük çaplı hasar oluşur.
10	25 - 29	Güçlü Fırtına	Ağaçlar köklerinden sökülür, yapılarda orta dereceli hasar oluşur .
11	29 - 34	Güçlü Fırtına	Geniş çaplı hasar oluşur.
12	34<	Kasırga	Sadece tropikal iklimlerde meydana gelir.

Tablo 2.4. Beaufort Cetveli Deniz Kriterleri (Karadeniz, 2002)

Deniz Kriterleri			
Beaufort Sayısı	Rüzgar Hızı (m/s)	Tanımı	Gözlenebilir Etkiler
0	0,0 - 0,4	Durgun	Deniz ayna gibidir.
1	0,4 - 0,8	Hafif	Dalga sırtı oluşmaksızın, kırışıkların görülmesi ile şırırtılar oluşur.
2	1,8 - 3,6	Hafif	Küçük dalgacıklar, kısa fakat belirgin kırışıklar, dalga sırtları cam görünümü alır ve bozulmazlar.
3	3,6 - 5,8	Hafif	Büyük dalgalar, dalga sırtları bozulmaya başlar, cam görünlü köpük oluşur, dalga sırtları köpürerek saçılabilir.
4	5,8 - 8,5	Orta	Küçük dalgalar daha çok uzar, oldukça sık beyaz köpükler oluşur.
5	8,5 - 11	Orta	Daha belirgin uzun ve orta büyüklükteki dalgalar, birçok beyaz köpük oluşur ve su saçılır.
6	11 - 14	Güçlü	Büyük dalgalar oluşmaya başlar, beyaz köpükleri ile dalga sırtları her yerde daha yoğun olarak görülür.
7	14 - 17	Güçlü	Su yukarı doğru sıçrar, rüzgarın yönü boyunca dalgaların kırılmasından oluşan beyaz köpükler, şeritler halinde patlak vermeye başlar.
8	17 - 21	Fırtına	Daha uzun boylu, oldukça yüksek dalgalar, dalga sırtlarının kenarları köpüklenecek şekilde kırılır, köpük rüzgarın yönü boyunca belirgin bir şekilde sürüklenir.
9	21 - 25	Fırtına	Yüksek dalgalar, rüzgarın yönü boyunca, yoğun köpük şekilleri, dalga sırtları dönmeye başlar, suyun saçılması görüşü etkileyebilir.
10	25 - 29	Güçlü Fırtına	Çok yüksek dalgalar , görüş nerdeyse sıfırdır.
11 - 12	29<	Kasırga	Sadece tropikal iklimlerde meydana gelir, felakettir.
12	34<		

Ayrıca, rüzgarlar, oluşum bölgelerine göre üç ana dalda incelenebilir.

2.9.2.1. Küresel rüzgarlar

Ekvator ve çevresi dünyanın diğer bölgelerine göre daha çok ısınır. Sıcak havanın yoğunluğu soğuk havaya göre daha az olduğundan, sıcak hava yerden 10 km kadar yükselerek kuzey ve güneye doğru yayılır. Dünya dönmeseydi, hava kuzey ve güney kutuplara kadar gider, oralarda soğur ve ekvatora geri dönerdi. Bu nedenle hakim rüzgar yönleri kuzey-güney doğrultusunda olurdu. Dünyanın dönmesiyle oluşan Coriolis kuvvetleri, 300 kuzey ve güney enlemlerine gelen sıcak havanın daha ileri gitmesini engeller ve sıcak hava alçalarak, sıcak havanın yükselmesi nedeniyle ekvatorda oluşan alçak basınç bölgesine doğru hareket eder. Böylece küresel rüzgarlar oluşur (Şen, 2003).

Yerel coğrafi koşullar küresel rüzgarları, dolayısıyla hakim rüzgar yönlerini çok az etkiler. Çünkü küresel rüzgarlar 1000 metre ve üstü yüksekliklerde oluşurlar. Bu yükseklik rüzgar türbini yüksekliğinden çok fazla olsa da, rüzgar türbinleri yerleştirilirken hakim rüzgar yönlerine az engel oluşturacak yönler seçilmelidir (Obitet, 2011).

2.9.2.2. Yüzey rüzgarları

100 m'den düşük yüksekliklerde rüzgarlar, dünya yüzeyinin coğrafi yapısından çok etkilenirler. Yüzey pürüzlülüğü, engeller nedeniyle rüzgarlar yavaşlar ve rüzgar yönlerinde değişimler olur. Rüzgar türbinleri genelde 100 metreden daha az yükseklikte olduğundan, rüzgar enerjisi söz konusu olduğunda önemli olan rüzgar çeşidi; yüzey rüzgarlarıdır (Obitet, 2011).

2.9.2.3. Yerel rüzgarlar

Hakim rüzgar yönlerini küresel rüzgarlar belirlese de, yerel iklim koşulları hakim rüzgar yönlerini etkiler. Yerel rüzgarları iki başlık altında inceleyebiliriz.

- Deniz Rüzgarları
- Dağ Rüzgarları

2.9.2.4. Deniz rüzgarları

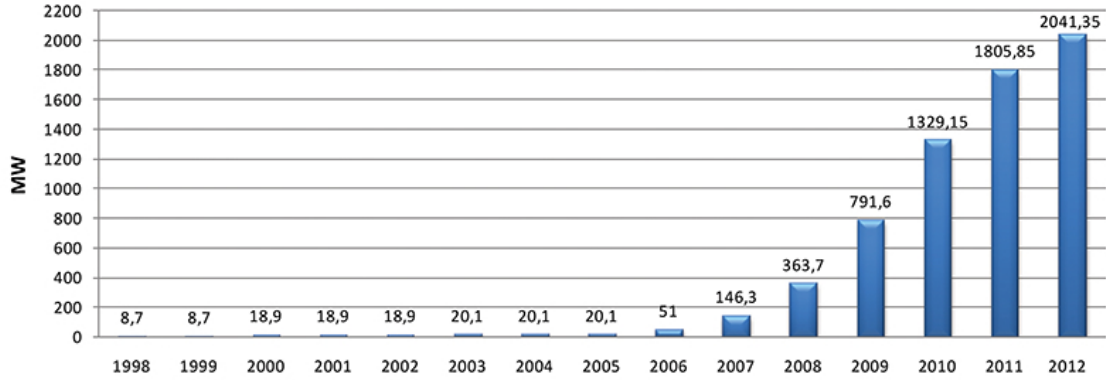
Karalar, denizlere göre daha çabuk ısınır ve soğurlar. Bu nedenle gündüzleri karadan yükselen sıcak hava yüzeyde bir alçak basınç bölgesi oluşturur. Böylece deniz üzerindeki nispeten soğuk hava, karaya doğru çekilir. Bu şekilde oluşan rüzgarlara deniz rüzgarları denir. Akşama doğru deniz ve kara sıcaklıkları arasındaki fark azalır ve hava durgunlaşır. Gece ise karalar daha çabuk soğuduğundan rüzgar karadan eser. Fakat deniz ve kara arası sıcaklık farkı gece daha az olduğundan rüzgar hızı da gündüze göre daha düşük olur. Muson rüzgarları, deniz rüzgarlarına bir örnektir (Obitet, 2011).

2.9.2.5. Dağ rüzgarları

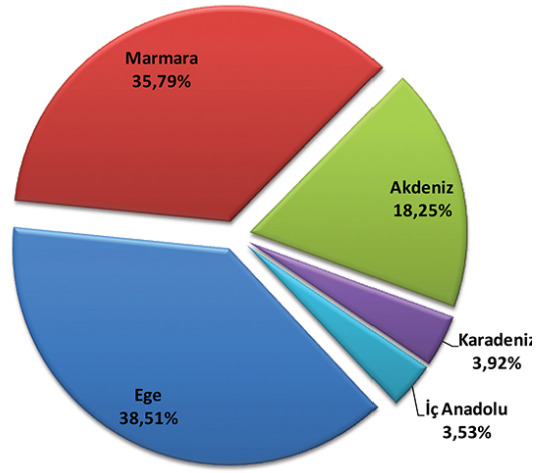
Gündüzleri ısınan hava dağ eteği boyunca yükselir. Geceleri ise hava ters yönde hareket eder. Böylece oluşan ve dağ rüzgarları olarak adlandırılan rüzgarlar çok güçlü olabilirler. Kuzey yarımküre için dağların güneye bakan eteklerinde (güney yarımkürede tam tersi) oluşan vadi rüzgarları buna bir örnektir. Alplerdeki Foehn, Rocky Dağları'ndaki Chinook ve And Dağları'ndaki Zonda rüzgarları bu türün en güçlü örneklerindedir (Obitet, 2011).

2.9.3. Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli

Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlasına (REPA) göre Türkiye'deki teorik rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW civarındadır. Mevcut elektrik şebeke alt yapısı dikkate alındığında ise elektrik şebekesine bağlanabilir rüzgar enerjisi potansiyeli 10.000 MW düzeyinde hesaplanmıştır. Ayrıca elektrik şebekesinde yapılabilecek olası revizyon çalışmaları sonucu orta vadede elektrik şebekesine bağlanabilir rüzgar enerjisi potansiyelinin 20.000 MW seviyesine yükselmesi olası gözükmektedir. 2020 yılına kadar Türkiye'de rüzgâr kurulu gücünde 20.000 MW seviyelerine ulaşılması öngörülmektedir (Rapor, 2010) Türkiye'de 2005 yılında 20,1 MW olan rüzgâr kurulu gücü 2012 itibariyle 2041,35 MW'a yükselmiş durumdadır(Şekil 2.3). Şekil 2.4' te işletmedeki RES' lerin bölgelere göre dağılımı gösterilmiştir. Türkiye'de kurulmuş olan ve yeni kurulacak RES'lerin detayları Tablo 2.5 ve Tablo 2.6' da gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Türkiye Rüzgar Enerjisinin Yıllara Göre Gelişimi (Tureb, 2012)



Şekil 2.4. İşletmedeki RES' lerin Bölgelere Göre Dağılımı (Tureb, 2012)

Tablo 2.5. Türkiye’de İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santral Projeleri (Tureb, 2012)

Mevkii	Şirket	Kurulu Güç (MW)	Üretime Geçiş Tarihi	Türbin Markası	Türbin Kurulu Gücü (MW)
Aydın	ABK En. Ür. San. ve Tic. A.Ş.	30.00	2012	Gamesa	2
Mersin	Akdeniz El. Ür. A.Ş.	33.00	2010	Vestas	3
Balıkesir	AkEn. El. Ür. A.Ş.	15.00	2009	Vestas	3
Manisa	Akhisar Rüz. En.El. San. Ltd. Şti.	45.00	2011	Nordex	2.5
Balıkesir	Alentek En. A.Ş.	45.00	2011	Nordex	2.5
Tekirdağ	Alize En. Ür. A.Ş.	28.80	2009	Enercon	2+2+0.8
Balıkesir	Alize En. Ür. A.Ş.	16.00	2010	Enercon	2
Manisa	Alize En. Ür. A.Ş.	25.60	2010	Enercon	2 + 0.9
Çanakkale	Alize En. Ür. A.Ş.	20.80	2009	Enercon	2 + 0.8
İzmir	Alize En. Ür. A.Ş.	1.50	1998	Enercon	0.5
Balıkesir	Alize En. Ür. A.Ş.	20.70	2009	Enercon	0.9
Çanakkale	Anemon En. El. Ür. A.Ş.	30.40	2007	Enercon	0.8
İzmir	Ares Alaçatı Rüz. En. San. Tic. A.Ş.	7.20	1998	Vestas	0.6
Balıkesir	As Makinsan En. El. Ür. San. Tic. A.Ş.	24.00	2010	Nordex	2.5
Aydın	Ayen En. A.Ş.	31.50	2009	Suzlon	2.1
Çanakkale	Ayres Ayvacık El. Ür. Sant. Ltd. Şti.	5.00	2011	Vestas	1.8
Balıkesir	Baki El. Ür. Ltd. Şti.	113.40	2008	Vestas	3
Hatay	Bakras En. El. Ür. ve Tic. A.Ş.	15.00	2010	Vestas	3
Hatay	Belen El. Ür. A.Ş.	36.00	2009/2010	Vestas	3
İzmir	Bergama RES En. Ür. A.Ş.	90.00	2010	Nordex	2.5
Manisa	Bilgin Rüz. Sant. En. Ür. A.Ş.	90.00	2010	Nordex	2.5
Balıkesir	Borasco En. ve kim. San. Tic. A.Ş.	60.00	2009/2010	Vestas	3
Edirne	Boreas En. Ür. San. Tic. Ltd. Şti.	15.00	2010	Nordex	2.5
Çanakkale	Bores Bozcaada Rüz. En. San. ve Tic. A.Ş.	10.20	2000	Enercon	0.6
Muğla	Dares Datça Rüz. En. Sant. San. ve Tic. A.Ş.	29.60	2008	Enercon	0.8+0.9
Hatay	Deniz El. Ür. Ltd. Şti.	30.00	2008	Vestas	2
Manisa	Deniz El. Ür. Ltd. Şti.	10.80	2007	Vestas	1.8
Manisa	Doğal En. El. Ür. A.Ş.	34.20	2008	Enercon	0.9
Çanakkale	Doğal En. El. Ür. A.Ş.	14.90	2007	Enercon	0.8+0.9
İzmir	Doruk En. Ür. San. Tic. A.Ş.	30.00	2011	Enercon	2
Çanakkale	Enerjisa En. Ür. A.Ş.	29.90	2011		2.3
Balıkesir	Galata Wind En. Ltd. Şti.	93.00	2011	Vestas	3
Çanakkale	Garet En. Ür. ve Tic. A.Ş.	22.50	2010/2011	Ge	2.5
İzmir	Innores El. Ür. A.Ş.	57.50	2008	Nordex	2.5
İzmir	Kardemir Haddecilik San. Tic. Ltd. Şti.	12.50	2011	Nordex	2.5
İzmir	Kores Kocadağ Rüz. En. Sant. Ür. A.Ş.	15.00	2010	Nordex	2.5
İstanbul	Lodos El. Ür. A.Ş.	24.00	2008	Enercon	2
İzmir	Mare Manastır Rüz. En. San. Tic. A.Ş.	39.20	2006/2007	Enercon	0.9+0.8
İzmir	Mazi-3 Rüz. En. Sant. El. Ür. A.Ş.	30.00	2009/2010	Nordex	2.5
Tokat	Pem En. A.Ş.	40.00	2012	Nordex	2.5
Osmaniye	Rotor El. Ür. A.Ş.	135.00	2009/2010	Ge	2.5
Aydın	Sabaş El. Ür. A.Ş.	24.00	2010	Vestas	2
İstanbul	Sanko Rüz. En. San. ve Tic. A.Ş.	60.00	2008	Vestas	3
Manisa	Soma En. El. Ür. A.Ş.	140.10	2011/2012	Enercon	2.0+0.9
İstanbul	Sunjüt Suni Jüt San. Tic. A.Ş.	1.20	2006	Enercon	0.6
İstanbul	Teperes El. Ür. A.Ş.	0.85	2006	Vestas	0.8
İzmir	Ütopya En. Ür. San. Tic. A.Ş.	30.00	2009/2010	Ge	2.5
Balıkesir	Yapısan El. Ür. A.Ş.	35.00	2006	Ge(30) + Nordex(5)	1.5
Hatay	Ziyaret RES El. Ür. San. Tic. A.Ş.	57.50	2010/2011	Ge	2.5
Kapasite Toplamı		1805.85			

Tablo 2.6. İnşaatı Devam Eden Kapasite (Tureb, 2012)

Mevkii	Şirket	Kurulu Güç (MW)	Kullanılan Türbin Markası	Kullanılan Türbin Kurulu Gücü (MW)
Kayseri	Aksu Temiz En. Ür. San. ve Tic. A.Ş.	72.00	Vestas	2
İzmir	Ayen En. A.Ş.	31.50	Suzlon	2.1
İzmir	Ayen En. A.Ş.	25.20	Suzlon	2.1
Muğla	Ayen En. A.Ş.	21.00	Suzlon	2.1
Amasya	Baktepe En.A.Ş.	40.00	Nordex	2.5
Balıkesir	Bangüç Bandırma El.Ür. A.Ş.	15.00	Nordex	2.5
Balıkesir	Bares El. Ür. A.Ş.	142.50	Ge	2.75
Bilecik	Can Enerji Ent. El. Ür. A.Ş.	40	Nordex	2.5
Mersin	Enerjisa En. Ür. A.Ş.	39.00	Siemens	3
Hatay	Eolos Rüz. En. Ür. A.Ş.	27.00	Alstom Wind	3
İzmir	Garet En. Üt. Ve Tic. A.Ş.	10.00	Ge	2.5
Balıkesir	Kapıdağ Rüz. En. Sant. El. Ür. San. Ve Tic. A.Ş.	34.85	Vestas	1.8
Aydın	Kıroba El. Ür. A.Ş.	19.50	Gamesa	2
İnşa Halindeki Kapasite Toplamı		517.55		

2.9.4. Dünyanın rüzgar enerji potansiyeli

Teknolojik olarak gelişmiş birçok ülke, rüzgâr enerjisinden yararlanmaya yönelik birçok araştırma yapmış ve önemli gelişmeler kaydetmişlerdir. Günümüz koşullarında geleneksel enerji üretim yöntemlerine nazaran bu potansiyelin bir kısmını ekonomik bir şekilde kullanmaktadırlar. Teknolojideki ilerlemeler sebebi ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında diğer kaynaklarla en rekabet edebilir kaynak durumuna gelen rüzgâr enerjisi; özellikle Çin’ de bir gelişim göstermiştir. Global rüzgar enerjisi pazarındaki ilk on ülke Tablo 2.7’ de gösterilmiştir. Yapılan araştırmalar ve değerlendirmeler dünyanın rüzgâr kaynaklarının yeterli derecede fazla olduğunu göstermektedir. Bu araştırmalar doğrultusunda birçok ülke rüzgar enerjine yönelmiş durumdadır. Teknik olarak yararlanılabilecek tüm rüzgâr kaynağının, 53.000 TWh/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Bu ise dünyanın 2020 yılında gereksinim duyacağı elektriğin iki katından fazladır. Bu nedenle, elektrik üretimi için rüzgar gücü kullanımında kaynağın yetersizliğinin kısıtlayıcı bir faktör

olması söz konusu değildir.

Tablo 2.7. Global Rüzgar Enerjisi Pazarındaki İlk On Ülke (Tureb, 2012)

Ülkeler	Kurulu Güç (MW)
Çin	67.774
ABD	49.802
Almanya	30.016
İspanya	22.087
Hindistan	17.351
İtalya	7.280
Fransa	7.182
İngiltere	6.840
Kanada	5.511
Portekiz	4.398
Dünyanın Geri Kalanı	35.500
Dünya Toplam	254.000

Belirli bir ülke için daha ayrıntılı değerlendirmeler yapıldığı zaman, bu değerlendirmeler, genel bir çalışmadakine göre çok daha yüksek bir potansiyel olduğunu ortaya çıkartma eğilimindedir. Örneğin, Almanya'da Ekonomi Bakanlığı, ülke potansiyelinin, 1993 yılında yapılmış OECD ülkeleri araştırmasındakine göre beş kat fazla olduğunu göstermiştir. Avrupa'da, özellikle yeni açık deniz rüzgâr piyasası hesaba katıldığında, 2020 yılına kadar, elektrik gereksiniminin en az % 20'sini karşılamaya olanak vardır (Tekin, 2006).

Şu anda 50'yi aşkın ülke toplam küresel kapasiteye katkıda bulunurken, bu artışla birlikte rüzgâr endüstrisinin istihdam ettiği kişi sayısının yüz bin civarında olduğu hesaplanmaktadır. Rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasının ardındaki itici güçlerden biride, gittikçe daha fazla oranda, küresel iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik acil gereksinimdir. Rüzgâr gücü, hem ana sera gazı olan karbondioksitin atmosfere salınımını önleyen bir enerji kaynağı sunmakta, hem de fosil yakıt yada nükleer enerjiyle ilişkili diğer kirleticilerin hiçbirini üretmemektedir. 1997 Kyoto Protokolü

ile başlayarak, bölgesel ve ulusal düzeyde bir dizi sera gazı azaltma hedefi, yürürlüğe girmiştir. Bunlar ise rüzgâr dahil olmak üzere, yenilenebilir enerjilerin payının artmasına ilişkin hedeflere dönüştürülmüştür (Tekin, 2006).

Türkiye gelişmekte olan ilk yirmi pazar içerisinde ilk sıradadır. Kurulu kapasite bakımından Türkiye dünya sıralamasında 26. sıradadır. 2005 yılında 20 MW kapasiteye sahipken, 2006 yılında kurulu kapasite % 260 artışla 65 MW'a yükselmiş, 2007 yılında bu dinamikliğine devam ederek % 280 artışla kapasitesini 207 MW'a kadar yükseltmiştir. Bu alanda yatırımlar hızla artmaya devam etmektedir (Karadağ, 2009). Tablo 2.8' de enerji üretimi için gerekli kaynaklarının durumu, maliyeti ve ömür açısından kıyaslanması gösterilmiştir. Enerji üretim sistemleri çevre açısından değerlendirildiğinde güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi ön plana çıkmaktadır (Tablo 2.9).

Tablo 2.8. Enerji Üretimin Kaynaklarının Maliyet ve Ömür Açısından Kıyaslanması (Dündar, 2003)

Enerji Türü	Dışa Bağımlı / Yerel	Kalan Ömür (yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/Kwh)	Üretim Maliyeti (cent/Kwh)
Petrol	Dış	40-45	1500-2000	6,0
Kömür	Yerel/Dış	200-250	1400-1600	2,5-3,0
Doğalgaz	Dış	60-65	600-700	3,0
Nükleer	Dış	-	3000-4000	7,5
Hidrolik	Yerel	-	750-1200	0,5-2,0
Rüzgar	Yerel	-	1000-1200	3,5-4,5
Güneş	Yerel	-	Yüksek	10,0-20,0
Jeotermal	Yerel	-	1500-2000	3,0-4,0

Tablo 2.9. Enerji Üretim Sistemlerinin Çevresel Etkileri Açısından Kıyaslanması (Dündar, 2003)

	İklim Değişikliği	Asit Yağmuru	Su Kirliliği	Toprak Kirliliği	Gürültü	Radyasyon
Petrol	X	X	X	X	X	-
Kömür	X	X	X	X	X	X
Doğalgaz	X	X	X	-	X	-
Nükleer	-	-	X	X	-	X
Hidrolik	X	-	-	-	-	-
Rüzgar	-	-	-	-	X	-
Güneş	-	-	-	-	-	-
Jeotermal	-	-	X	X	-	-

BÖLÜM 3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE TÜRBİN BİLEŞENLERİ

Rüzgar türbinlerinde rüzgardaki kinetik enerji önce mekanik enerjiye ardından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bir rüzgar türbini genel olarak; kule, kanatlar, dişli kutusu, jeneratör ve elektrik-elektronik elemanlardan oluşmaktadır.

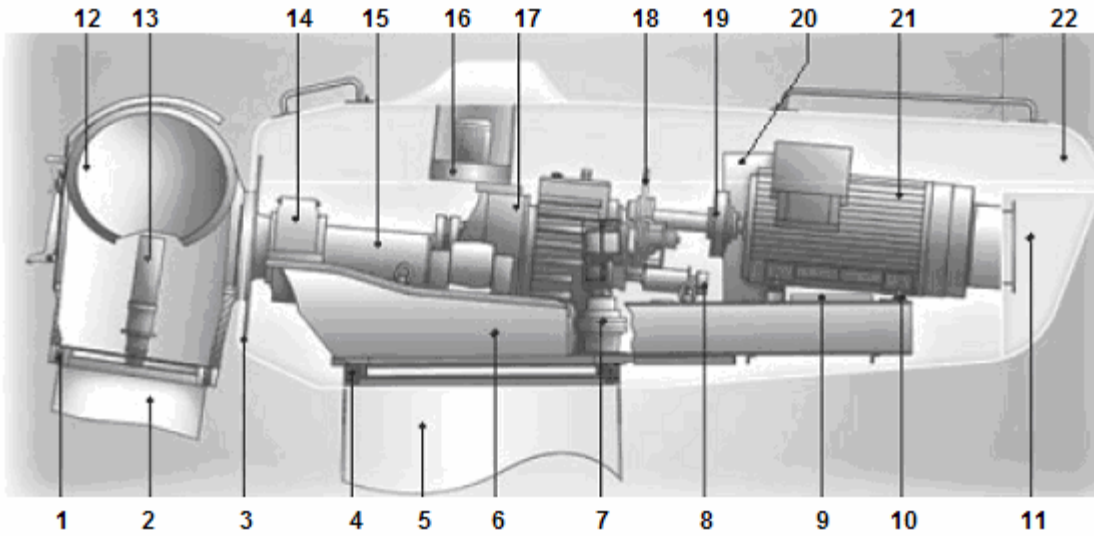
Rüzgar türbinleri rüzgarın serbest bir şekilde ve bir engel olmaksızın estiği yerlere kurulmalıdır. Türbin kulesinin yüksek olması yeryüzüne yakın rüzgar profilinin yüksek hızdaki kısmını kullanmaya da yarar. Rüzgarın kinetik enerjisi kanatlar ve göbeğin bağlandığı rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak, gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya direkt olarak alıcılara ulaştırılarak kullanılır.

3.1. Türbinin İç Yapısı

Rüzgar türbinleri rotor mil eksenine göre dikey ve yatay olmak üzere ikiye ayrılır. Dikey rüzgar türbinleri daha çok deneysel olup, ticari amaçlı uygulamaları azdır. Günümüzde enerji üretiminde büyük oranda yatay türbinler kullanılmaktadır. Yatay bir türbin sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir. Şekil 3.1’deki sistemler;

Rotor : Kanatlar ve kanatları birleştiren göbek, rotor olarak adlandırılır. Günümüzde daha çok 2 kanatlı veya 3 kanatlı sistemler kullanılmaktadır. Sistemin hareket mili rotor göbeğine bağlıdır.

Kanatlar : Kanatlar, esen rüzgarın uçak kanatlarında yarattığı kaldırma kuvveti prensibine göre çalışırlar. Bu şekilde dönen sistemler rüzgar enerjisini rotora aktarırlar. Modern megawatt boyutlu sistemlerde bu kanat boyutları 35 metreden büyük olabilir.



1 Rotor	9 Akümülatör	17 Dişli sistemi
2 Kanat	10 Ses yalıtımı	18 Fren
3 Rotor kilidi	11 Havalandırma	19 Kuplaj sistemi
4 Sapma yatağı	12 Rotor göbeği	20 Kontrol paneli
5 Kule	13 Kanat açısı (pitch) sürücüsü	21 Jeneratör
6 Ana Gövde	14 Yataklama	22 Dış yüzey
7 Sapma sürücüsü	15 Rotor shaftı	
8 Transmitter	16 Yağ soğutucusu	

Şekil 3.1. Rüzgar Türbini İç Yapısı (Ergür, 2006)

Rüzgar türbinleri 1, 2, 3, 4 veya daha çok kanattan oluşmaktadır. Malzeme olarak paslanmaya dayanıklı galvanizli sac, ahşap veya özel karbon ile karıştırılmış kompozit malzemeler kullanılır. Kanatlar plastikle güçlendirilmiş camdan (GRP, Glass Reinforced Plastic), tahtadan, tahta laminetten, plastikle güçlendirilmiş karbon fiberden (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic), çelikten veya alüminyumdan yapılmaktadır. Dünyada yapılan çoğu kanatlarda GRP kullanılmaktadır.

Küçük rüzgar türbinler için, çapı 5 metreden az, kullanılacak malzeme seçiminde, ağırlık, sertlik ve ya kanat karakteristiklerinin yerine daha çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Fakat büyük ölçekli türbinler söz konusu olunca kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir. Büyük rüzgar türbinlerinin çoğunda GRP kullanılmaktadır. Bu malzeme hafifliği, yüksek dayanıklılık sağlamasının yanında, diğer malzemelere göre ucuzdur. CFRP yapımı kanatlar prototiplerde başarı sağlamış ve sınırlı bir üretimi vardır. Bu malzeme GRP den daha yüksek dayanıma ve hafifliğe sağlaması bir avantaj olmasına rağmen, çok pahalı olması ekonomik açıdan

kullanımını sınırlamıştır.

Kanatlar yapılırken, reçine içine yatırılıp mukavemeti arttırılmakta ve pürüzlerin oluşmaması için vakum içinde tutulmaktadır. Küçük türbinlerin ağırlık problemini gidermek için hafif malzemeler kullanılırken, büyük türbinler için ağırlıktan çok aerodinamiklik önem taşımaktadır. İyi bir kanat için bazı kriterler vardır. Bunlar; yüksek kaldırma ve sürüklenme kuvveti, çok yüksek rüzgârlarda ani duruş veya yavaşlama karakteristiği, pürüzsüzlük, düşük gürültü karakteristiği olarak belirlenmiştir. Yakın geçmişe kadar mühendisler kanat olarak helikopter ve gemi pervaneleri kullandı. Fakat bunlar rüzgâr türbinleri için ideal değildir. Rüzgâr için kaldırma gücünü maksimum yapan ve bunun yanında ani duruşları önleyecek ve böylece sürüklenme gücünü azaltacak türbinler uygundur. Fakat bazen de yüksek hızlarda tahribatı önlemek için yavaşlatma gerekmektedir. Bunun için kanatın açısı ile oynanmakta ve kararsız kaldırma gücünün etkisi en aza indirilmektedir (Demir, 2007).

Kule : Kule, rüzgar türbinlerinde ana gövde ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır.

Tüp şeklindeki kule şekli daha çok tercih edilmektedir. Genellikle 20-30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynak ile montaj edilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir. Şekil 3.2' de kule tipi örnekleri görülmektedir.

Kanat açısı sürücüsü : Rüzgar hızının elektrik üretmek için çok düşük veya çok yüksek olduğu zamanlarda veya rüzgar hızı değiştiğinde, rotorun dönmesini engellemek için, rotor kanatlarının rüzgara karşı gelen açıları değiştirilerek rüzgarın oluşturduğu kaldırma kuvvetinin değiştirilmesiyle bir hız kontrolü yapılmış olur.



Şekil 3.2 Kule Tipleri (Uysal, 2003)

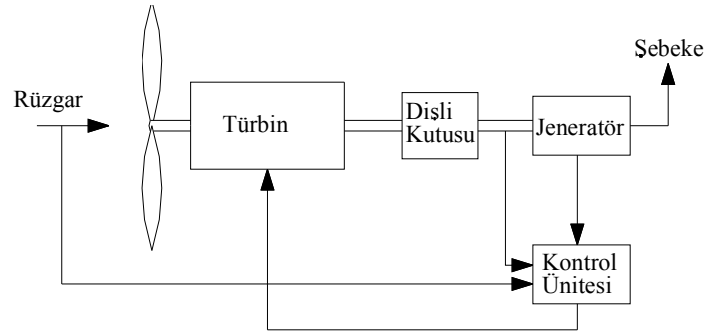
Sapma sürücüsü : Sapma sürücüsü, rüzgarın yönü değiştikçe rotoru döndürerek, sistemin rüzgara karşı durmasını sağlar. Sapma motoru tarafından hareket ettirilir. Dönüş yönü ve miktarı, rüzgar kanatçığında alınan bilgiler ile kontrol sistemi tarafından hesaplanır.

Rotor Şaftı: Bu şaft rotoru dişli sisteme veya doğrudan tahrikli sistemlerde jeneratöre bağlar.

Fren: Acil durumlarda rotoru durdurmaya yarar.

Dişli Sistemi: Dönüş hızı yüksek jeneratörler için geçerlidir. Pahalı ve ağır bir sistemdir.

Jeneratör: Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Doğru akım (DC), senkron ve asenkron jeneratör olabilir. DC jeneratörler lokal türbin uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Asenkron jeneratörler güç elektroniği ile şebekeye uygun duruma getirilebilmektedir.



Şekil 3.3. Rüzgar Türbini Basit Şeması

3.2. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik göstermektedirler. Türbinler, dönme eksenine, güç kontrol sistemlerine, rotorun dönüş hızına ve kullanım yerine göre sınıflandırılabilirler.

3.2.1. Düşey eksenli ve yatay eksenli rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

3.2.1.1. Düşey eksenli rüzgar türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde kanatlar düşey safta bağlanmıştır. Rüzgâr doğrultusundan etkilenmedikleri için yönlendiriciye ihtiyaçları yoktur. Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları da daha azdır. Yatay eksenli türbinlere göre bu avantajlarının yanı sıra, dezavantajları daha çoktur. Türbin kanatlarının dizaynı dolayısıyla verimleri düşüktür, kanatların yere yakınlığı sonucu daha düşük rüzgâr hızında çalışmak durumundadırlar ve bu enerji üretimini azaltır. Bu türbinler çalışmaya kendi kendine başlayamaz, bu yüzden çalışmadan önce şebekeden enerji çekmek zorunda kalırlar. Ayrıca bu türbinlerin, yere bağlanmaları için çelik halatlara gereksinim duyulur. Verimin düşüklüğü dolayısıyla düşey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamıştır. Uygulama Kanada ve Kaliforniya'daki birkaç ünite ile sınırlı kalmıştır (Emniyetli, 2007). Şekil

3.4' te dūşey eksenli bir rüzgar türbini gösterilmiştir.

Bu türbinlerin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Jeneratör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmek gerekmez. Böylece kule masrafı olmaz.
- Türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. Yani dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Elde edilen güç toprak seviyesinde çıktığından, nakledilmesi daha kolaydır.

Dezavantajları ise şöyledir:

- Yere yakın oldukları için alt noktadaki rüzgar hızları düşüktür.
- Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir.
- İlk hareket motoruna ihtiyacı vardır.
- Ayakta durabilmesi için tellerle yere sabitlenmesi gerekir. Bu da pek pratik değildir.
- Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir.



Şekil 3.4. Düşey Eksenli Bir Rüzgar Türbini

3.2.1.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinin ise, yaygın bir kullanım yeri yoktur. Rüzgarı önden alan türbinlerin iyi tarafı, kulenin oluşturduğu rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Kötü tarafı ise, türbinin sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin yapılmasıdır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerde ise; eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, dümen sistemine gerek yoktur. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat büyük çaplı türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih edilmez. Bunun nedeni ise; serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle de toplanması sağlıklı değildir. Fakat küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler (Emniyetli, 2007).

Yatay eksenli türbinlerin bir başka sınıflandırması ise, dönme hızlarına göre. Yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinleri ve yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri adı altında iki gruba ayrılırlar. Ayrıca rüzgarı alışı yönüne göre, önden rüzgarlı ve arkadan rüzgarlı türbinler olarak da iki gruba ayrılır (Şen, 2003). Şekil 3.5' te yatay eksenli bir rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yatay Eksenli Bir Rüzgar Türbini (Enerjik, 2012)

3.2.1.2.1. Yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinleri

İlk olarak 1870'li yıllarda ABD'de çok kanatlı düşük hızlarda çalışan türbinler üretilmeye başlandı. Günümüzde 12 ile 24 adet arasında değişen kanatlar, rotorun ya tüm yüzeyini, ya da hemen hemen tüm yüzeyini kaplar. Yerleştirilen kuyruk kanadı dümen işlevini görür. Genellikle bu tip rüzgar türbinlerinin çapı 5 ile 8 m arasında değişir. Bu tipin en büyük örneği ABD'de inşa edilmiş olup, çapı 15 m' dir. Yavaş çalışan rüzgar türbinleri 2-3 m/s arası rüzgar hızlarında kendiliğinden çalışmaya başlarlar. Bu türbinlerin özellikleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir (Şen, 2003).

- Genellikle hızları 3-7 m/s arasında değişen rüzgarlarda kullanılırlar.
- Elektrik üretimi için verimleri düşüktür.
- Çap büyüdükçe ağırlık artacağından, bu türbinleri kurmak kolay değildir.
- Bu tipteki türbinler, daha çok su pompalama işi için idealdirler. Genellikle pistonlu pompalarda kullanılırlar.

3.2.1.2.2. Yüksek hızlarda çalışan rüzgar türbinleri

Yüksek hızlarda çalışan bu tip rüzgar türbinlerinde kanat sayısı 1 ile 4 adet arasındadır. düşük hızlarda çalışan çok kanatlı rüzgar türbinlerinden çok daha fazla hafiftirler. En çok kullanılan üç kanatlı rüzgar türbini şekil 3.2' de gösterilmiştir. İki kanatlı türbinler, üç kanatlılara göre %2-3 daha az verimlidir. Tek kanatlı türbinler ise, iki kanatlı türbinlerden %6 daha az verimlidirler. Ayrıca tek kanatlı türbinlerde dengeleyici olarak karşı ağırlık kullanılır. Yüksek rüzgar hızlarında çalışan bu tip türbinlerde kanat sayısı arttıkça verim artar. Ancak 3 kanattan daha fazla sayıda kanat, maliyeti önemli ölçüde arttıracığından tercih edilmez. Bir ve iki kanatlı türbinler daha hızlı döndüklerinden, üç kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yaparlar. Bütün bunların yanında, üç kanatlı türbinlerin estetik görünüşleri de bu tip türbinlerin daha çok tercih edilmesinde önemli bir etkidir (Şen, 2003).

Söz konusu türbinlerin yavaş hızlarda çalışan rüzgar türbinlerine göre avantajları şunlardır;

- Düşük kanat sayısı; bu tipteki türbinlerin fiyatını ve ağırlığını önemli ölçüde azaltır.
- Ani rüzgar patlamalarından kaynaklanan basınç değişimlerinden az etkilenirler.
- Çok yüksek hızlarda çalışan kanat koruyucu sistemleri, bu tip türbinlerde daha ucuzdur.
- Yüksek verimleri nedeniyle günümüzde elektrik üretimi amaçlı kullanılan rüzgar türbinlerinin büyük çoğunluğu bu tip türbinlerdir.



Şekil 3.6. Üç Kanatlı Rüzgar Türbini

3.2.2. Önden rüzgarlı türbinler

Yatay eksenli türbinlerde rotor yüzü rüzgara yönlenmiş ise önden rüzgarlı türbinler adını alırlar. Bu türbinlerin en önemli üstünlüğü kulenin yapacağı gölgeleme etkisine maruz kalmamasıdır. Yıllardır yaygın olarak bu makineler kullanılmıştır. Öte yandan yine de kulenin önünde, az da olsa, bir rüzgar gölgelemesi vardır. Yani rüzgar kuleye eğilerek gelir. Kule yuvarlak ve düz olsa bile, kanatın kule hizasından her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalır. İşte bu nedenle rüzgar çekilmesinden dolayı

kanatların çok sert yapılması ve kuleden biraz uzakta yerleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca önden rüzgarlı makineler, rotoru rüzgara karşı döndürmek için yaw mekanizması ile donatılmışlardır (Emniyetli, 2007).

3.2.3 Arkadan rüzgarlı türbinler

Bu türbinlerde rotor, türbinin arkasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Fakat türbin rotora perdeleme etkisi yaptığı için kullanımı yaygın değildir (Önder, 2006).

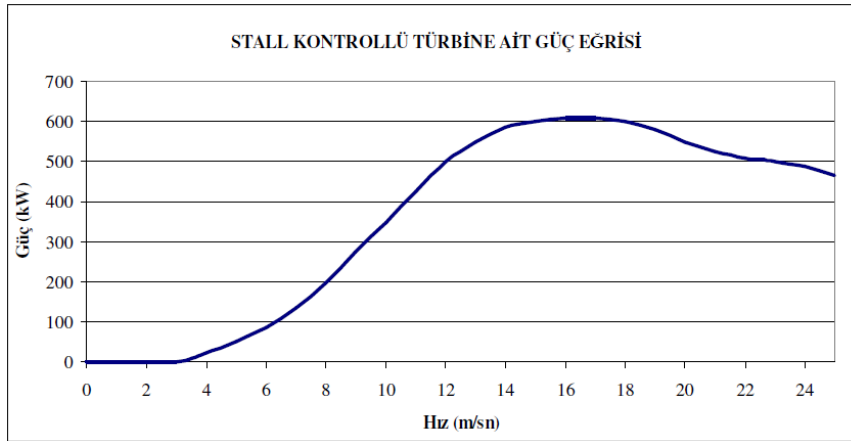
3.3. Güç Kontrolü Sistemine Göre Sınıflandırma

Rüzgar türbinleri, nominal gücü vermek üzere tasarlandıkları hızların (nominal hız) üzerinde, türbinin zarar görmesini önlemek amacıyla kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu sistemler, türbin nominal hızı aştıktan sonra kanatların aerodinamik performansını düşürerek jeneratörde oluşabilecek aşırı yüklemeyi önlerler. Bu amaçla kullanılacak 5 temel tasarımdan söz edilebilir. Bunlar kullanım yaygınlıklarına göre:

- Pasif Stall Kontrolü
- Aktif Pitch Kontrolü
- Aktif Stall Kontrolü
- Sapma Kontrolü
- Pasif Pitch Kontrolü (Emniyetli, 2007)

3.3.1. Stall kontrollü türbinler

Stall kontrollü türbinler, göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş kanatlara sahip sistemlerdir. Bu sistemler, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve kanadın stall etkisine girmeye başlaması sayesinde güç kontrolü sağlarlar. Kanat geometrisi, rüzgar nominal hızın üzerindeki hızlarda arttıkça, performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Kanat kök bölgesinden başlayarak stall etkisine girer, bu şekilde tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yükleme sebebiyle türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenmiş olur (Emniyetli, 2007).

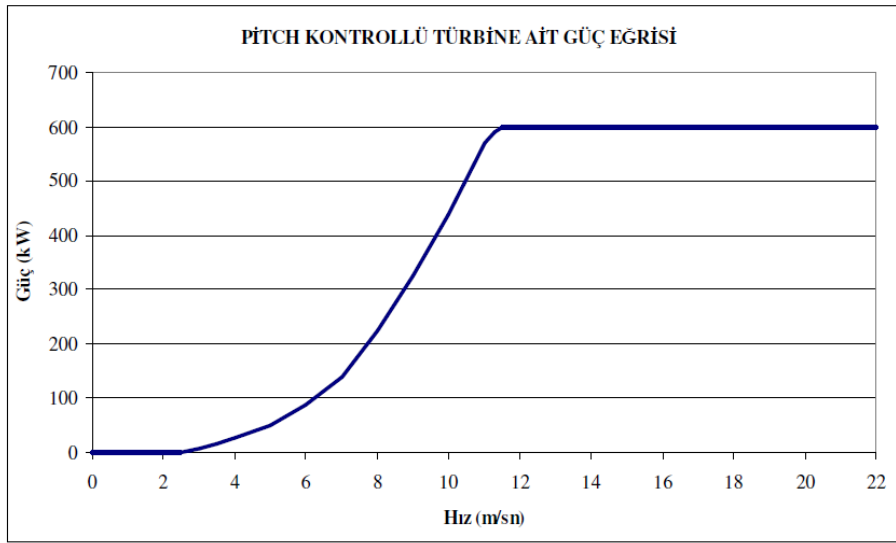


Şekil 3.7. Stall Kontrollü Türbine Ait Güç Eğrisi (Emniyetli, 2007)

3.3.1.2. Pitch kontrollü türbinler

Pitch kontrol, jeneratörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch kontrollü rüzgâr türbinlerinde bulunan elektronik aksama bağlı hız kontrol sistemi saniyede birkaç kez güç çıkışını kontrol eder. Güç çıkışı normalden çok yüksekse, hız kontrol sistemi pervane pitch mekanizmasına sinyal göndererek durumu bildirir. Gelen bu sinyalden sonra, pervane kanatları da yönünü rüzgârın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar. Ters durumda da yani, rüzgâr hızı azaldığında aynı hız kontrol ve sinyal gönderme işlemi meydana gelir ve pervane bu kez rüzgârın estiği yöne doğru yönelir. Jeneratör nominal güçte (rated power) çalışırken, rüzgâr hızı düştüğü zaman pervane kanatları yatay eksenleri etrafında dönecektir; yani pitch açıları değişerek hücum açısını azaltıp hava akışının etkilerini düzenleyecektir. Nominal rüzgâr hızından yüksek hızlarda sadece nominal güçte üretebileceği kadar enerji üretilir (Özaktürk, 2007). Şekil 6.2' de pitch kontrollü 600 kW'lık bir türbin olan Dewind D-4'e ait verilerle oluşturulmuş güç eğrisi görülmektedir.

Bu sistemler MW sınıfı türbinlerde daha yaygın olarak kullanılmakla birlikte, 600 KW sınıfı türbinlerde de kullanılmaktadır. Pitch kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan pitch mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır.



Şekil 3.8. Pitch Kontrollü Türbine Ait Güç Eğrisi

Bu makineler sahip oldukları pitch sistemleri sebebiyle yüksek hızlarda yapısal sorunlar yaşamaya, sabit kanatlı stall kontrollü türbinlere oranla daha eğilimlidirler (Emniyetli, 2007).

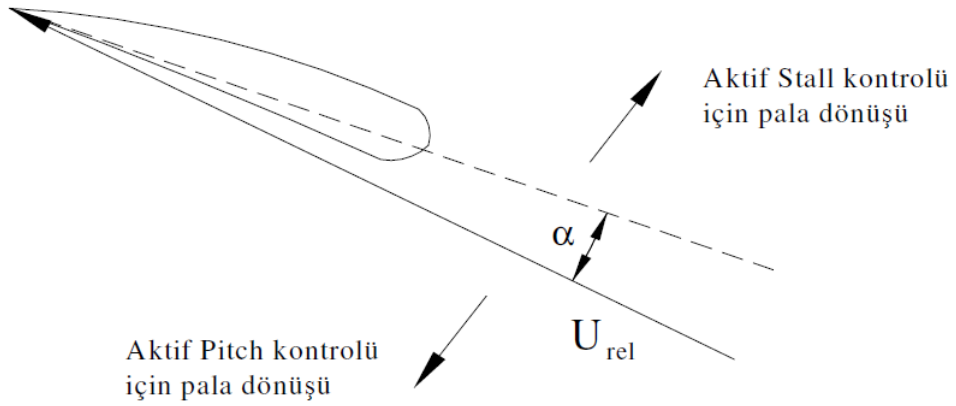
3.3.3. Aktif stall kontrollü türbinler

Aktif stall kontrolü, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarımdır. Bu sistemde de pitch kontrollü türbine benzer şekilde güç kontrolü için kanat, eksenini etrafında döndürülerek nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sağlanır, fakat dönüş yönü pitch kontrolündekinin tersidir. Pitch kontrollü türbin, nominal hızın üzerine çıktığında kanadı hücum açısını düşürecek şekilde döndürülürken, aktif stall kontrollü bir türbin kanadı ters yönde çevirip, türbini stall etkisine sokar. Bu dönüş hareketleri Şekil 3.9' da gösterilmiştir.

Aktif stall kontrollü türbinin güç eğrisi pitch kontrollü türbine benzer. Aktif stall ve aktif pitch kontrollü türbinler için gerekli kanat döndürme açılarının kıyaslaması şekil 3.10' da gösterilmiştir.

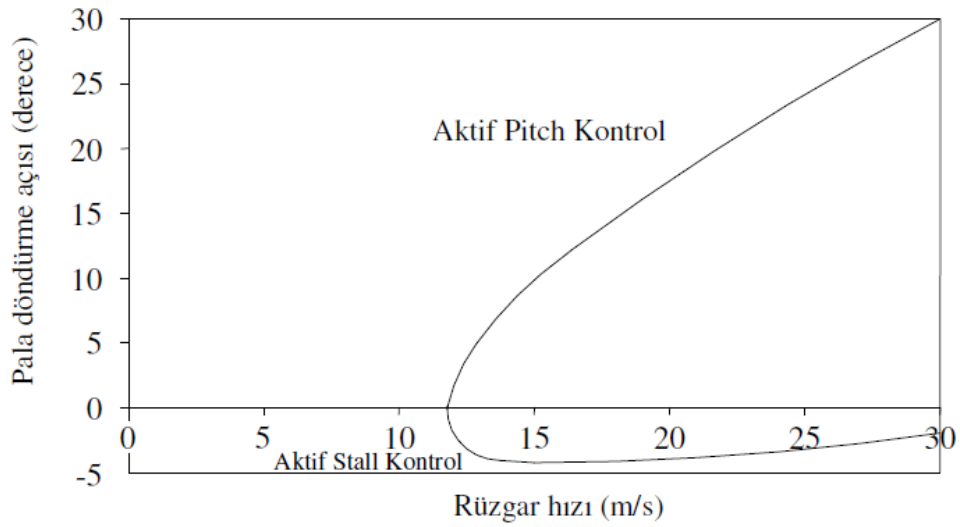
Şekil 3.10' da görüldüğü gibi, bu tasarımda güç kontrolü için gerekli pala döndürme açıları, aktif pitch kontrolüne göre oldukça düşüktür. Bu sayede türbin rüzgar

hızındaki değişimlere daha hızlı yanıt verebilir.



Şekil 3.9. Aktif Stall ve Aktif Pitch Kontrolü İçin Pala Dönüş Yönleri

Ayrıca türbin nominal hızın üzerinde stall etkisine girmiş olacağından, ani rüzgarlara karşı hassasiyeti daha düşük olacaktır.



Şekil 3.10. Aktif Stall Ve Aktif Pitch Kontrollü Türbinlerde Güç Kontrolü İçin Gerekli Kanat Döndürme Açılarının Kıyaslaması

3.4. Rotor Hızına Göre Sınıflandırma

Türbinler, rotorun dönüş hızına göre temel olarak iki sınıfa ayrılırlar:

- Sabit hızlı türbinler
- Değişken hızlı türbinler

3.4.1. Sabit hızlı türbinler

Sabit hızla dönen pervaneler basit yapıdadır, çünkü pervane hızı şebeke frekansına göre ayarlanır. Uç hız oranı λ , çalışma sırasında sabit kalmayabilir, yani en iyi aerodinamik verim sadece sabit bir rüzgâr hızında alınır. Dolayısıyla türbin için hesaplanmış özel rüzgâr hızı dışındaki değerlerde tam verim alınmaz. Rüzgâr türbini çalışırken en iyi aerodinamik verimliliği alabilmek için, türbin üreticileri çift-sabit hızlı indüksiyon jeneratör kullanmışlardır. Bu durum, pervane hızının iki adımda değişmesine imkân tanımaktadır. Düşük rüzgâr hızlarında jeneratör düşük hızlarda hareket ederken; yüksek rüzgâr hızlarında yüksek dönme hızı ile çalışmasını sürdürmektedir. Pervane hızının, sabit bir veya iki adımda kontrolü kolaydır. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinin büyük bir çoğunluğu sabit hızlı pervane sistemine göre tasarlanmıştır (Özaktürk, 2007).

3.4.2. Değişken hızlı türbinler

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin temel avantajı, geniş bir rüzgar hızı aralığında optimum uç hız oranında çalışabilmeleri, böylece rotor verimliliğini yükseltip daha fazla enerji elde edilmesini sağlamalarıdır. Bu türbinler genel olarak birlikte kullanıldıkları pitch sistemi ile birlikte nominal hızdan çok düşük hızlarda dahi yüksek verimlilikle çalışabilirler. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgar hızlarında, düşük devirlerde çalıştıkları için gürültü konusunda da avantaj sağlarlar. Değişken hızlı tasarım, dişli kutusuna gelen yükün düşmesini sağlamakla birlikte bu türbinlerde, sabit hızlılarda kullanılanlardan farklı özelliklere sahip jeneratörlerin kullanılması gerekmektedir (Emniyetli, 2007).

Değişken hızlı tasarımın sağladığı faydalara rağmen çok yaygın olarak kullanılmamasının ana sebebi güç elektroniği maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Bu sebeple bu tür sistemlerin büyük ölçekli sistemlerde kullanılması maliyet açısından daha uygun görülmektedir. Değişken hızlı tasarım 600 KW sınıfında da kullanım alanı bulmaya başlamıştır. De-Wind firmasının ürettiği D4-46, D4-48 modelleri bu sistemi kullanan türbinlere örnek olarak gösterilebilir (Dewind, 2004).

Yukarıda açıklanan sistemler arasındaki seçimde ana kriter, sağlayacağı faydanın maliyetini karşılayıp karşılamayacağıdır. Türbin elektrik üretimi amacıyla imal edilenler arasında en yaygın görülen tasarım olan 3 kanatlı, önden rüzgarlı (upwind) bir türbin olarak tasarlanacaktır. Dünya’da elektrik üretimi amaçlı tasarlanan türbinlerin yaklaşık % 75’ini önden rüzgarlı (upwind) türbinler oluşturmaktadır. Bu türbinler, arkadan rüzgarlı (downwind) türbinlerde görülen kule etkisine maruz kalmadıklarından daha düzgün bir akım elde edebilmektedirler. Türbinde kullanılacak daha gelişmiş bir sistem maliyetteki artışı karşılayacak bir enerji üretimi artışı sağlayacaksa kullanılabilir. Bu sebeple aktif pitch kontrolü, aktif stall kontrolü ve değişken hız gibi gelişmiş türbin tasarımlarının kullanımı, türbin boyutundaki artış ile birlikte artmaktadır (Çolak, 2000).

BÖLÜM 4. RÜZGARIN GÜCE DÖNÜŞÜMÜ

Bir cismin konumu nedeniyle sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji, hareketi sebebiyle sahip olduğu enerjiye ise kinetik enerji adı verilir. Hareket halinde bulunan her cismin bir kinetik enerjisi vardır.

V hızı ile hareket eden hava kütesinin hacmi Vh , yoğunluğu ρ ile gösterilirse hava için kinetik enerji eşitliği;

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Vh \cdot V^2 \quad (4.1)$$

Hareket halindeki hava kütlesi, rüzgar türbininin A süpürme alanındaki kanat sistemine düşey yönde çarptığı zaman, çarpan havanın kinetik enerjisinin bir kısmı frenlenerek rüzgar türbininin dönmesini sağlar. Kanatların süpürme alanına çarpan havanın debisi AV ise, birim zamanda yapacağı iş yani rüzgar gücü denklem 4.2' deki gibidir.

$$Po = \frac{\rho}{2} \cdot V \cdot AV^2 = \frac{\rho}{2} \cdot V^3 \cdot A \quad (4.2)$$

Süpürme alanına çarpan rüzgar hızının V , birim zamanda yapacağı basınç p ve iş fonksiyonları da dikkate alındığında maksimum teorik rüzgar türbin gücü denklem 4.3 elde edilir.

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} V^3 \cdot A \quad (4.3)$$

Burada;

P_{max} : Maksimum teorik rüzgar türbin gücü, kW

ρ : Hava yoğunluğu, m^3/kg

A: Kanat sisteminin süpürme alanı, m^2

V: Rüzgar hızı, m/s

Teorik rüzgar türbin gücünün maksimum olduğu zaman, sisteme çarpan V rüzgar hızının, sistem tarafından frenlenip arka kısma geçen, V_2 rüzgar hızına olan oranı (rüzgar oranı) $1/3$ 'tür. Aerodinamik faktörlerden dolayı maksimum dinamik güç, türbin gücünden fazla olmaktadır. Rüzgar türbinleri tarafından üretilen güç, havadaki orijinal gücün %59.3' ü kadardır.

Hava yatay bir ekseninde rüzgar türbinine yaklaşırken, silindirik bir akış olduğu kabul edilmektedir. Dolayısı ile akışkan kayıplar sebebi ile türbin kanatlarıyla dağıtılan gerçek güç, P_{max} ' tan daha azdır. Bu durumda sistemin verimi, rotorun yapısına, tipine, hız oranına ve kanatların tipine bağlıdır. İyi bir hava dinamiği tasarımının iki kanatlı rotor için tahminen dönüşüm verimi %75 olarak kabul edilir.

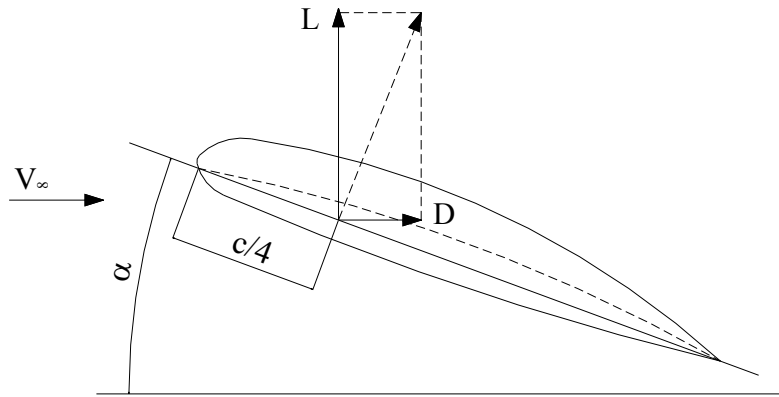
4.1. Rüzgar Türbini Kanat Karakteristiği

Rüzgar türbinlerinin nasıl çalıştığını anlamak için sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri çok iyi bilinmelidir. Sürüklenme kuvveti, cisim üzerinde akış yönünde meydana gelen bir kuvvettir. Örneğin düz bir plaka üzerinde meydana gelecek maksimum sürüklenme kuvveti hava akışının cisim üzerine 90 derece dik geldiği durumda iken, minimum sürüklenme kuvveti de hava akışı cismin yüzeyine paralelken meydana gelir. Kaldırma kuvveti ise, akış yönüne dik olarak meydana gelen bir kuvvettir. (Uçakların yerden havalanmasına da bu kuvvet sebep olduğu için kaldırma kuvveti olarak adlandırılmıştır.) Sürüklenme kuvveti için ise paraşüt örneği verilebilir. Bu kuvvet sayesinde paraşütün hızı kesilmektedir. Sürüklenme kuvvetinin etkilerini minimuma indirebilmek için yapılmış özel cisimlere akış hatlı cisimler(elips, balıklar, zeplin vb) denir. Düz bir plaka üzerine etkileyen kaldırma kuvveti, hava akışı plaka yüzeyine 0 derece açı ile geldiğinde görülür. Havanın akış yönüne göre meydana gelen küçük açılarda akış şiddetinin artmasından dolayı düşük basınçlı bölgeler meydana gelir. Bu bölgelere akış altı da denir. Dolayısıyla hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki

meydana gelmiş olur. Yani hava akış hızı arttıkça basınç düşer, hava akış hızı azaldıkça ise basınç artar. Bu olaya Bernoulli etkisi denir. Kaldırma kuvveti de cismin üzerinde emme veya çekme meydana getirir (Uysal, 2003).

4.1.1. Rüzgar türbini kanat profili

Rüzgar türbinlerinde kanat profilini etkileyen en önemli özellik hücum açısıdır. Hücum açısı (α), kanat referans ekseninin hava akışı arasında yaptığı açıdır. Kanat profilinin referans eksenine veter hattı denir. Hafif bombeli yüzeyler, verilen bir hücum açısı için daha büyük bir kaldırma kuvveti meydana getirirler. Dolayısıyla kanat profili denen bu tip şekiller bu durum için uygundur. Kanat profili üst yüzeyde daha hızlı bir akış meydana getirmektedir. Yüksek hava akış hızı, kanat profilinin üst kısmında basıncı düşürerek alçak basınç bölgesi meydana getirir. Bunun sonucu olarak emme etkisi meydana gelerek kanat havalanır. Simetrik ve asimetric olmak üzere iki temel kanat profili vardır. Şekil 4.1’de türbin kanat profili verilmiştir (Ağçay, 2007).



Şekil 4.1. Rüzgar – Kanat Profili İlişkisi

c : Veter uzunluğu (Kiriş Uzunluğu)

L : Kaldırma kuvveti

D : İtme (sürüklenme, direnç) kuvveti

α : Hücum açısı

Bu iki temel kanat profilinde bazı ortak noktalar vardır bunlar; Dışbükey olmaları, hücum kenarlarının dairesel, firar kenarlarının da keskin ve sivri olmalarıdır.

Aralarında ki temel fark ise, alt yüzeylerin şeklidir. Asimetrik kanat profillerinde, profilin alt yüzeyi hava akışı yönüne en yakın noktadan maksimum kaldırma yaparken simetrik kanat profillerinde her iki yüzeyde de aşağı yukarı eşit bir kaldırma görülür (Uysal, 2003).

Kanat profillerinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin özellikleri, rüzgar tüneline yapılan testlerle belirlenmektedir. Bu testlerde farklı hücum açılarında birimsiz büyüklükler olan sürüklenme katsayısı (C_d) ve kaldırma katsayısı (C_l) hesaplanır. Bu katsayılar yardımı ile türbin için en uygun kanat yapısı tasarlanır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri havanın akış hızına, kanadın boyutuna, hava yoğunluğuna ve hücum açısına göre değişir. Verilen bir profil için, kaldırma ve sürüklenme katsayıları rüzgar tüneline testlerine veya analitik formüllere dayanarak ya da hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde bilgisayarda hücum açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Farklı hücum açılarında sürüklenme katsayısı (C_d) ve kaldırma katsayısı (C_l) hesaplanır. Bu katsayılar birimsiz büyüklüklerdir. Bu katsayılar yardımıyla türbin için uygun kanat yapısı belirlenir (Uysal, 2003).

Kanatlar, türbinlerde mekanik gücün geliştirilmesi amacıyla kullanılan elemanlardır. Kanadın kiriş ve uzunluğu aerodinamik performansını etkiler. Dolayısıyla kanat profillerinin özellikleri yapılacak olan dizaynı etkiler. Kanat seçimindeki en önemli etken Reynolds sayısıdır. Çünkü en uygun hücum açısını (α) bulmak performans belirlemesi için gerekli bir husustur. Kaldırma ve sürüklenme katsayısı hem kanat kesitine hem de Reynolds sayısına bağlıdır. Modern türbinlerde kullanılan kanatların kiriş ölçüleri MegaWatt büyüklüğündeki türbinlerde 2 m'ye kadar ulaşmaktadır. Kanatların uç hız oranları (λ) ise 0,5 den 10'a kadar değişmektedir. Dolayısıyla Reynolds sayısı da 0.3 milyondan ile 10 milyon arasında değişmektedir. Reynolds sayısını bulmak için öncelikle görünür rüzgâr hızının bulunması gerekir (Önder, 2006).

$$V_a = \frac{\left(\frac{r}{R}\right) \lambda U_\infty}{\cos \varphi} \quad (4.4)$$

V_a : Görünür rüzgar hızı (m/s)

r : Rotordaki radyal mesafe (m)

R : Rotor yarıçapı (m)

U_∞ : Serbest akan rüzgar hızı (m/s)

φ : Görünür rüzgar açısı

Uç hız oranı (λ) üç kanatlı rüzgâr türbinleri için yaklaşık 6 olarak alınabilir. Rüzgârın rotor düzlemine çarptığı açı φ ise, denklem 4.5' eşitliği ile elde edilir (Önder, 2006).

$$\varphi = \left(\frac{2}{3}\right) \tan^{-1} \left(\frac{R}{r\lambda}\right) \quad (4.5)$$

Reynolds sayısının hesaplanabilmesi için tahmini bir kiriş uzunluğunun bilinmesi gereklidir. Kiriş mesafesi olan c denklem 4.6 eşitliği ile elde edilir (Önder, 2006).

$$c = \frac{16\pi R \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda^2 B} \quad (4.6)$$

B : Rotor kanat sayısı

Bulunan bu değerler 4.7 nolu eşitlikte yerine konulduğunda Reynolds sayısı elde edilmiş olur;

$$Re = 68500.c.V_a \quad (4.7)$$

Hesaplanan Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenen kanat tiplerinin sürüklemeye-kaldırma katsayılarına bakılarak en uygun kanat seçimi yapılır;

Denklem 4.8' de sürüklemeye katsayısı denklemi, denklem 4.9' da kaldırma katsayısı denklemi ifade edilmiştir.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4.8)$$

D : Sürüklenme kuvveti (N)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m³)

V : Hava hızı (m/s)

A : Kanat Alanı (m²)

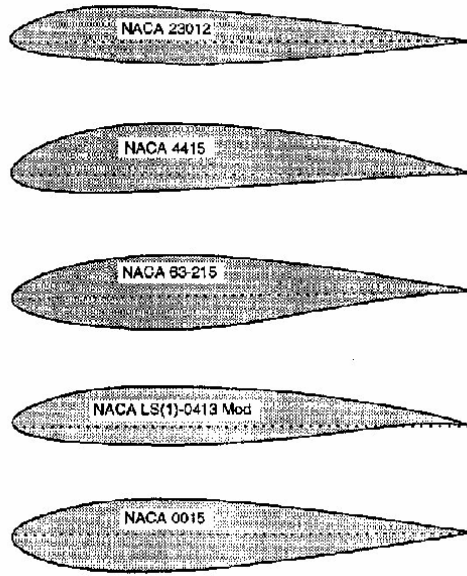
Kaldırma katsayısı;

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4.9)$$

L : Kaldırma kuvveti (N)

Her iki katsayıda rüzgar tünellerinde farklı hücum açıları ve rüzgar hızlarında hesaplanmaktadır.

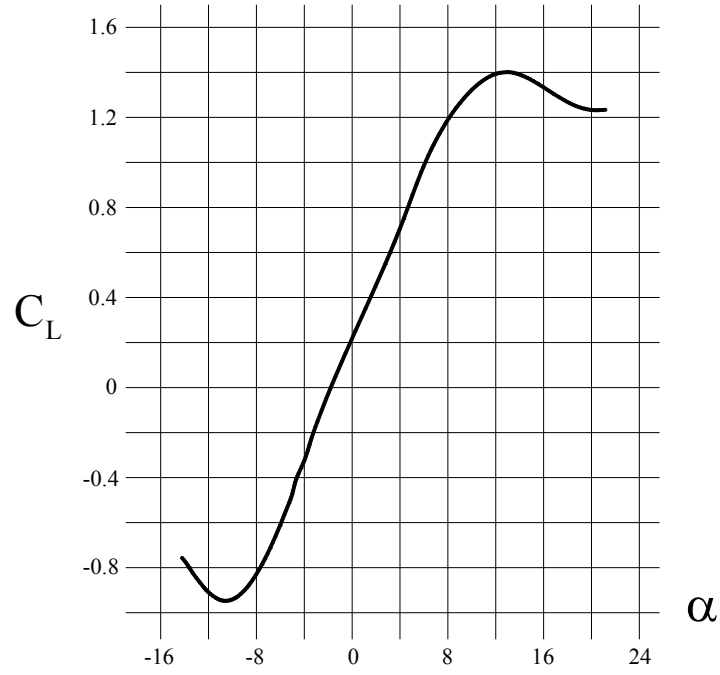
Rüzgar türbin kanatlarında profil olarak daha çok NACA, LS ve LM profilleri kullanılmaktadır. Şekil 4.2' de rüzgar türbinlerinde kullanılan bazı NACA kanat profil şekilleri ve Tablo 4.1' de bazı NACA kanat profil özellikleri verilmektedir. Şekil 4.3' te NACA 4415 kanat profiline ait kaldırma katsayısı ve hücum açısı değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.4' te kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerleri gösterilmiştir.



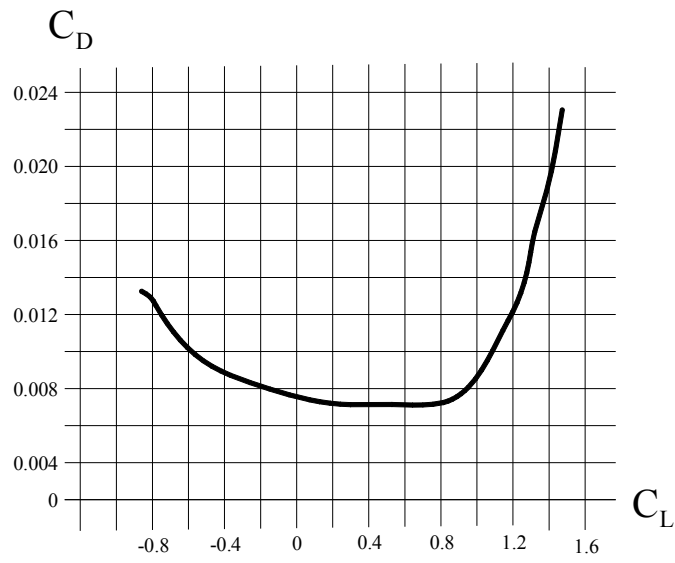
Şekil 4.2. Bazı Rüzgar Türbini NACA Kanat Profilleri (Önder, 2006)

Tablo 4.1. Türbinlerde Kullanılan Bazı NACA Profillerinin Özellikleri (Önder, 2006)

Profil	α (Hücum veya geliş açığı)	C_L Kaldırma Katsayısı	C_D Sürüklenme katsayısı
Naca 23012	-2	0.0	0.006
	8	0.872	0.010
	20	1.210	0.190
Naca 23015	-2	-0.001	0.007
	8	0.898	0.010
	20	1.270	0.167
Naca 4412	-4	0.003	0.008
	8	1.135	0.014
	20	1.504	0.164
Naca 4415	-4	-0.038	0.075
	8	1.102	0.012
	20	1.304	0.013
Naca 0012	25	0.835	0.445
	75	0.567	2.006
	150	-0.976	0.689



Şekil 4.3. NACA 4415 Profili $C_L - \alpha$ Eğrisi (Karadağ, 2009)



Şekil 4.4. NACA 4415 Profili $C_D - C_L$ Eğrisi (Karadağ, 2009)

4.1.2. Kanat sayısının etkisi

Türbin tasarımında ilk göz önüne alınması gereken parametre kanat sayısıdır. Rüzgar türbinleri kanat sayısı 2 ile 40 arasında değişecek şekilde dizayn edilebilirler. Kanat

sayısının çok olduğu durumlar düşük uç hızı oranlı rotorlar için kullanılırlar. Bu durum yüksek kalkma momentinin gerektiği su pompalanması gibi uygulamalar için geçerlidir.

Yüksek uç hızı oranlı rotorlar elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanır. Kanat sayısı kararlaştırılırken dikkat edilecek ana faktörler;

- Güç katsayısı üzerine etkisi
- Uç hız oranı
- Maliyet

Önceleri tek kanatlı ve 2 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılsa da, günümüzde yaygın olarak 3 kanatlı rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

4.1.3. Kanat yapımında kullanılan malzemeler

Rotor kanatlarını yapımında cam lifli güçlendirilmiş plastik (GRP), karbon lifli güçlendirilmiş plastik (CFRP), ahşap alüminyum veya çelikten yapılabilmektedir. Küçük rüzgar türbinler için (çapı 5 metreden az) kullanılacak malzeme seçiminde, ağırlık, sertlik veya kanat karakteristiklerinin yerine daha çok üretim verimliliği ön plana çıkmaktadır. Fakat büyük ölçekli türbinler söz konusu olunca kanat profiline uygun malzeme seçimi oldukça önemlidir. Büyük rüzgar türbinlerinin çoğunda GRP kullanılmaktadır. Bu malzeme hafifliği, yüksek dayanıklılık sağlamasının yanında , diğer malzemelere göre ucuzdur. CFRP yapımı kanatlar prototiplerde başarı sağlamış ve sınırlı bir üretimi vardır. Bu malzeme GRP den daha yüksek dayanıma ve hafifliğe sağlaması bir avantaj olmasına rağmen, çok pahalı olması ekonomik açıdan kullanımını sınırlamıştır (Uysal, 2003)

Ahşap çok uzun zamandan buyana kullanılan bir malzemedir. Ucuz ve hafif olmasına karşın, neme karşı hassas olması ve işlem maliyetleri dezavantajıdır. “Soğuk kalıp” olarak adlandırılan bir teknikle bu problemin üstesinden gelinmiştir. Ahşap kaplama tahtaları bir vakum torbasında epoksi reçine ile haddelenerek, kanat kalıbı şeklinde preslenir. Bu biçimde elde edilen kanatlar, özellikle, büyük rüzgar

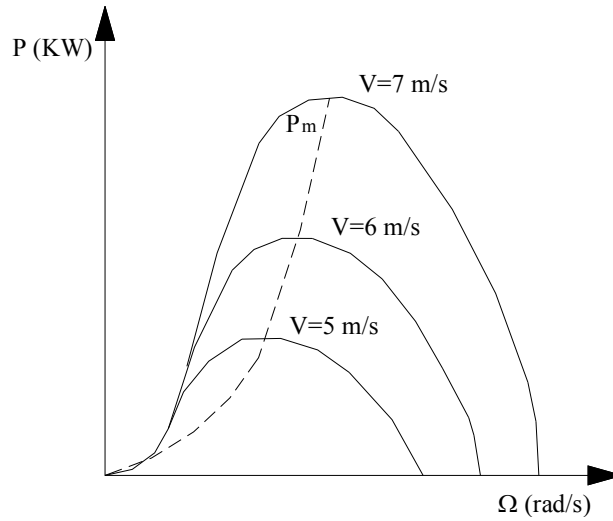
türbinlerinde dayanıklılık ve hafiflik bakımından diğerlerine göre oldukça büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Bunlar üzerine çalışmalar devam etmektedir. Çelik ve alüminyum bileşimleri ağırlık ve metal yorgunluğu gibi problemler nedeniyle sadece küçük güçlü türbinlerde kullanılmaktadır (Ena, 2007).

4.2. Rüzgar Türbini Karakteristikleri

4.2.1. λ (Uç hız oranı) :

Kanadın ucundaki çevresel hızın, rüzgar hızına oranı olarak tarif edilir.

Rüzgar türbini dizaynında öncelikle pervane hızının güç üretimi üzerindeki etkisini incelemek gerekir. Belli bir rüzgar hızında pervanenin rüzgardan çekebileceği gücün pervanenin dönme hızına bağlı değişimini gösteren grafik şekil.4.5' teki gibidir.



Şekil 4.5. Rüzgar Türbini Pervanesinde Gücün Hıza Bağlı Değişimi

Buradaki her bir eğri farklı rüzgar hızlarına aittir. Görüldüğü gibi rüzgar hızı sabit iken maksimum güç, sadece belli bir açısal hızda elde edilebilmektedir. Rüzgar hızı arttıkça maksimum güç noktasına tekabül eden açısal hız da artmaktadır. Söz konusu P - Ω grafiğinde her rüzgar hızı için maksimum güç noktalarını birleştiren bir P_m eğrisini çizmek mümkündür. Bu durumda pervaneden en iyi aerodinamik verimi alabilmek için pervanenin P_m eğrisini takip edecek şekilde çalıştırılması gerekir. Şekil 4.5' te her bir rüzgar hızı için çizilen eğrileri tek bir eğri ile ifade edebilmek için

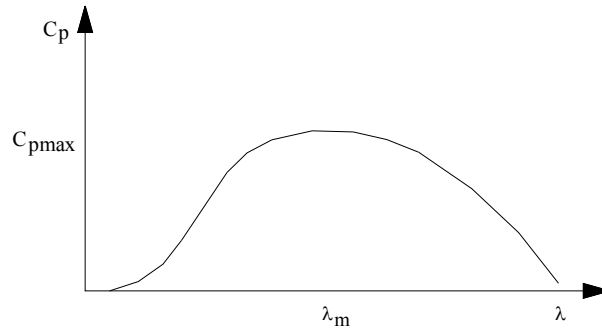
güç (P) ve açısal hız (Ω) parametrelerini boyutsuzlaştırıp, güç yerine 'güç katsayısı' (C_P), açısal hız yerine de 'uç hız oranı' (λ) parametrelerini kullanmak gerekir. Böylece P- Ω eğrileri basitleştirilerek Şekil 4.6' daki tek bir $C_P - \lambda$ eğrisine dönüştürülebilir.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (4.10)$$

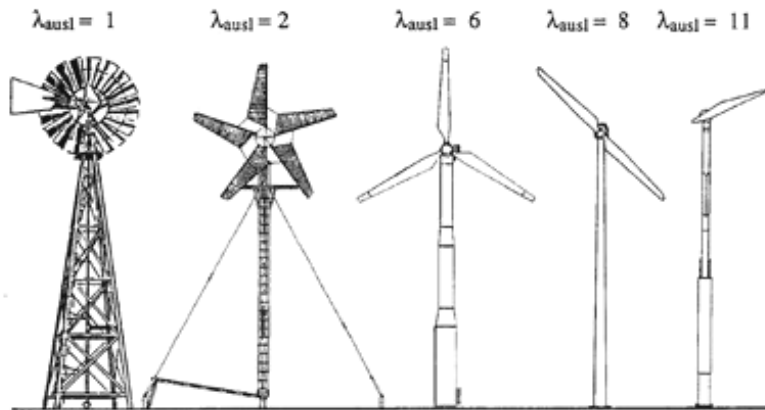
R : Kanat süpürme alanının yarıçapı (m)

Ω : Rotorun açısal hızı ($2\pi n$) (1/s)

V : Rüzgar hızı (m/s)



Şekil 4.6. Rüzgar Türbini Pervanesinde Aerodinamik Verimin Uç Hız Oranına Bağlı Değişimi (Ena, 2007)



Şekil 4.7. Uç Hız Oranı – Kanat Sayısı İlişkisi (Johnson, 2001)

4.2.2. σ (Katılık oranı)

Rotor kanatlarının kapladığı alanın, Kanatların süpürdüğü alanın tamamına oranı olarak tanımlanır. Katılık oranı denklem 4.11' de ifade edilmiştir.

$$\sigma = A / A \quad (4.11)$$

A : Rotor kanatlarının kapladığı alan

A : Rotor kanatlarının süpürdüğü alan

Belli bir katılık oranı için, pala sayısı ne kadar az olursa bir palaya ait kesit alan değeri o kadar artacağından palanın dayanımı da artacaktır. Yapısal dayanım açısından pala sayısının mümkün olduğunca az seçilmesi iyidir. Belli bir katılık oranı için pervanedeki pala sayısının az olması oluşan gerilmeler açısından avantaj sağlamaktadır.

Dinamik eslemeyi sağlayabilmek için pervanedeki pala sayısı azaldıkça daha yüksek uç hız oranlarında çalışmak gerekir. Dolayısıyla pervane milinde yüksek hızlar elde edebilmek için pervanede olabildiğince az sayıda pala kullanılır.

Pala sayısı arttıkça aerodinamik verim de artar. Pala sayısının bir adetten ikiye çıkması aerodinamik verimin %6 artmasına neden olurken bu sayının ikiden üçe çıkması verimde %3'lük ek bir artış daha getirir. Pala sayısının daha fazla artırılması pala rijitliğinde önemli miktarda azalmaya neden olurken kazanılan verim artışı oldukça azdır.

Rüzgar türbini tasarımcıları tarafından kullanılmaya başlanan bir başka optimizasyon kriteri ise minimum enerji maliyetidir. Bu kriter gereği yapılacak olan optimizasyon işlemi disiplinler arası bir çalışmayı gerektirmektedir. Söz konusu çalışmada bir aerodinamik model, palalar için yapısal bir model, palaların maliyet modelleri, türbine ait ana komponentler göz önüne alınır ve her uç optimizasyon kriteri birlikte kullanılır. Minimum enerji maliyetine göre yapılan optimizasyon düşük pervane katılık oranı ile yüksek pervane hızlarına doğru bir eğilimi doğurmaktadır. Fakat bu

büyükükler maksimum yıllık enerji üretimi ve gürültü parametreleri tarafından sınırlandırılırlar.

4.2.3. P_f (Faydalı güç)

Sistemden elde edilen güç, faydalı güç olarak tanımlanır.

$$P_f = \eta_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4.12)$$

η_t : Sistemin toplam verimidir.

Pratikte bir rüzgar enerji türbininin faydalı gücü aşağıdaki şekilde kabaca tahmin edilebilir.

$$P_f = (0.1-0.3) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4.13)$$

4.3. Rüzgar Türbininin Aerodinamik Verimi

Rüzgar türbinleri ile ilgili ilk teori 1926 yılında Göttingen Institute' de Dr. Albert BETZ tarafından ortaya atılmıştır. Bu teoremden, rüzgar rotorunun ideal olduğunu varsayılır. Diğer bir ifade ile rotor, havaya karşı sürüklenme direnci göstermeyen sonsuz sayıda kanattan oluşmaktadır. Bu şekilde, rüzgar rotorunun mükemmel bir enerji dönüştürücüsü olduğu varsayılmıştır. Bu teoriye göre;

Rüzgar hareket halinde hava olup sahip olduğu kinetik enerji denklem 4.14 ile ifade edilir.

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_r^2 \quad (4.14)$$

Rüzgar gücü, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjisinin zamana göre türevidir;

$$Pr = d / dt(1/2 \cdot m \cdot V_r^2) \quad (4.15)$$

Bir başka ifadeyle denklem 4.16' daki gibidir. Kütlesel debi denklem 4.16' da verilmiştir.

$$P_r = 1/2 \cdot \dot{m} \cdot V_r \quad (4.16)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V_r \quad (4.17)$$

Buradan hareketle rüzgarın gücü denklem 4.18' de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$P_r = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^3 \quad (4.18)$$

Birim analizi yaparsak güç birimi Watt olur.

$$Kg / m^3 \cdot m^2 \cdot m^3 / s^2 = Kg \cdot m / s^2 \cdot m / s = N \cdot m / s = Watt$$

Rüzgar, kinetik enerjisi nedeniyle doğal bir potansiyele sahiptir. Bunun bilinen fiziksel konular ve teknolojik imkanlar sayesinde yararlı enerjiye çevrilen miktarına “rüzgar enerjisi teknik potansiyeli” denir.

Bu durumda türbinin gücü,

$$P_T = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V_2 \cdot (V_r^2 - V_3^2) \quad (4.19)$$

Ortalama türbin içindeki rüzgar hızı denklem 4.20' deki gibi hesaplanır.

$$V_2 = (V_r + V_3) / 2 \quad (4.20)$$

Türbin gücünü ifade eden denklem 4.19 formülünde V_2 yerine yazılırsa,

$$P_T = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot (V_r + V_3) / 2 \cdot (V_r^2 - V_3^2) \quad (4.21)$$

veya;

$$P_T = 1/2 \cdot \rho \cdot A V_r \cdot 1/2 \cdot (1 + V_3/V_r) \cdot (1 - (V_3/V_r)^2) \quad (4.22)$$

Burada (4.18) denklemi (4.22) denkleminde yazılırsa denklem 4.23 elde edilir.

$$P_T = P_r \cdot 1/2 [(1 + V_3/V_r) \cdot (1 - (V_3/V_r)^2)] \quad (4.23)$$

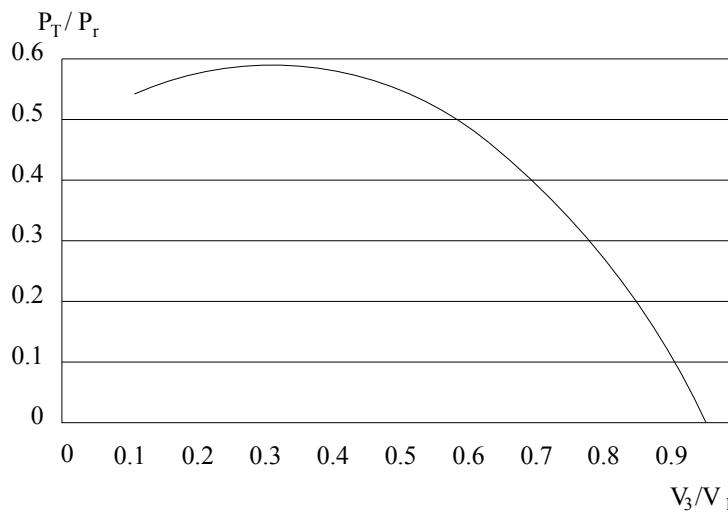
Burada güç faktörü $C_p = P_T/P_r$ ve yavaşlatma faktörü $n = V_3/V_r$ olarak tanımlanırsa 4.23 denklemi, 4.24 denkleme dönüşür.

$$C_p = 1/2 \cdot (1 + n) \cdot (1 - n^2) \quad (4.24)$$

Bu denklemde maksimum güç faktörü C_p 'yi bulmak için yavaşlatma faktörü n ' in türevi alınıp sıfıra eşitlenirse denklem 4.25 bulunur.

$$\begin{aligned} dC_p / dn &= 1/2 \cdot d/dn(1 - n^2 + n - n^3) \\ n_1 &= 1/3, \quad n_2 = -1 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Yavaşlatma faktörünün değişimi Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yavaşlatma Faktörü Değişimi

Yavaşlatma faktörü n , hiçbir zaman negatif değer olamayacağından $1/3$ alınır ve 4.25 denkleminde yerine konursa denklem 4.26 bulunur.

$$\begin{aligned} C_{p_{\max.}} &= 1/2(1+1/3).(1-1/9) \\ C_{p_{\max.}} &= 0,5926 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Serbest pervaneden alınacak maksimum verim olarak bulunur. Yani bir rüzgar türbiniyle, rüzgarın tüm enerjisinden faydalanmak imkansızdır. Rüzgar, rüzgar türbininden, rüzgardan aldığımız enerji ölçüsünde yavaşlamış olarak çıkar. Eğer rüzgardaki tüm enerjiyi alabilseydik, rüzgarın türbinden durgun halde çıkması gerekirdi. Fakat bu durumda da türbine rüzgarın diğer taraftan girmesi engellenir ve hiç enerji elde edilmezdi.

Çağdaş rüzgar türbinleri için C_p değeri yaklaşık olarak 0,40'tır. Bunun nedeni hava direnci, rotorun oluşturduğu türbülans ve aktarma organları ile elektrik sistemi gibi noktalardaki kayıplardır.

5.4. Kayıplar

Optimal bir rüzgar türbini pervanesinden alınabilecek güç en çok;

$$P_p = C_{p_{\text{Betz}}} \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot A V_r^3 \quad (4.27)$$

$$P_p = 0,5926 \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_r^3 \quad (4.28)$$

olabilir. Fakat uygulamada bu değere ulaşılamaz. Bunun nedenleri kayıplardır.

Pervanedeki bu kayıplar 3 ana başlık altında toplanırlar.

1. Profil kayıpları: İhmal edilen direnç kuvvetlerinden kaynaklanırlar.

Hesaplamalarda profil kayıpları 4.29, 4.30 ve 4.31 denklemleri ile ifade edilir.

$$\lambda_A = V_c / V_r = R.n.\pi / (30.V_r) \quad (4.29)$$

$$\varepsilon = C_A / C_W \quad (4.30)$$

$$\zeta_{PROFIL}(\lambda_A, \varepsilon) = 1 - \lambda_A / \varepsilon \quad (4.31)$$

Burada dizayn devirlilik sayısı (λ_A), çevresel hız (V_c), kayma sayısı (ε), kaldırma kuvveti kat sayısı (C_A), direnç kuvveti katsayısı (C_W) ile gösterilir.

- 2. Uç kayıpları:** Kanat ucunda, profil alt kısmından profil üst kısmına doğru hava akımı oluşur. Kanat uçlarındaki bu akım ile kanada gelen hava akımı üst üste binerek, gittikçe genişleyen girdap oluştururlar.

Hesaplamalarda bu kayıp denklem 4.32 ile dikkate alınır.

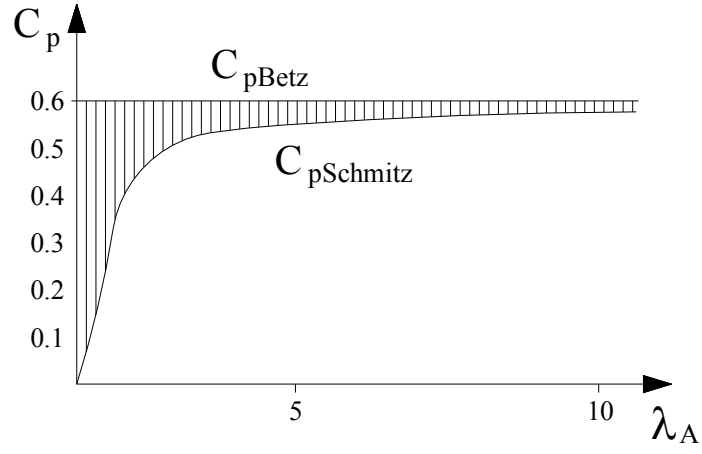
$$\zeta_{uc}(Z, \lambda_A) = 1 - [1,84 / (z.\lambda_A)] \quad (4.32)$$

Burada kanat sayısı (z) ile gösterilir.

- 3. Girdap kayıpları:** Betz Kriteri'ne göre rüzgar hızı, pervane düzlemi öncesi ve sonrasında doğrultusunu değiştirmez. Halbuki kanada çarpan hava kütlesi, kanat sonrasında doğrultusunu değiştirir ve girdap oluşturur. Girdap kayıpları Schmitz tarafından verilen $C_{P_{Schmitz}} - \lambda_A$ eğrisi yardımıyla hesaba katılır. Şekil 4.9' da $C_{P_{Schmitz}} - \lambda_A$ eğrisi verilmiştir.

Sonuçta, bir rüzgar türbini pervanesinin gerçek güç faktörü denklem 4.33 ile bulunur (Şen, 2003).

$$C_{P_{gerçek}} = C_{p_{Schmitz}}(\lambda_A) \cdot \zeta_{Profil}(\lambda_A, \varepsilon) \cdot \zeta_{uc}(z, \lambda_A) \quad (4.33)$$



Şekil 4.9. $C_{pSchmitz} - \lambda_A$ Eğrisi (Şen, 2003)

BÖLÜM 5. RÜZGAR TÜRBİNİ MODELLENMESİ VE DİZAYNI

Rüzgar türbini tasarımı için öncelikler gerekli güç, ortalama bir evin enerji ihtiyacı dikkate alınarak seçilmiştir. Bu güç değerinde ortalama rüzgar hızının sabit bir hızda (5 m/s) olduğu kabul edilip, üç kanatlı 3,2 m çapında bir rüzgar türbini tasarımı ve rüzgar türbini bileşenlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar doğrultusunda rüzgar türbini bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak tasarlanmış ve katı modeli oluşturulmuştur. Tasarım aşamasından ardından imalat resimleri çizilmiş ve imalat safhasına geçilmiştir. Güç ihtiyacı doğrultusunda kanat çapı belirlenmiş ve rotor hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda gerekli devir hesaplanmış ve kanat profili seçilmiştir. Türbin kanat profili olarak Naca 4415 kullanılmıştır. Elektrik üretimi açısından uygun devire ulaşmak için dişli kutusu tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Türbin sisteminin aşırı rüzgarlardan korunması ve türbin sisteminde meydana gelen bir arıza durumunda sisteme müdahale etmek için fren mekanizması türbine montaj edilmiştir. Tasarımın gerçekleştirilmesi için elektrik üretici olarak doğru akım çıkış veren jeneratör kullanılmıştır. Jeneratör çıkışında kullanılan elektrik taşıyıcı kabloların türbinin dönmesi durumunda birbirine dolanmasını önlemek amacı ile fırça sistemi kullanılmıştır. İmalatı tamamlanan rüzgar türbini gerekli alt yapı işlemleri gerçekleştirildikten sonra 6 metre çelik boru üzerine montaj edilmiştir.

Türbinde, rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye dönüşmektedir. Türbin rotor milinin devir sayısı dişli kutusu ile hızlandırılarak, gövdedeki jeneratöre aktarılmıştır. Tasarım hesaplamaları Betz teoremine göre yapılmıştır ve değerler aşağıda verilmiştir.

5.1. Gerekli Güç

Bir evin ortalama aylık enerji ihtiyacı 244 KWh.'tır. Kurulacak rüzgar türbini Tablo

5.1' de yer alan enerji ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanmıştır. Rüzgar hızı 5 m/s sabit kabul edilmiştir. Tablo 5.1' de bir evin aylık bazda enerji tüketimi gösterilmiştir. Hava akımındaki kinetik enerjiden kaynaklanan güç;

$$P = C_p \frac{\rho}{2} \pi R^2 V^3 \quad (5.1)$$

5.2. Rotor Hesaplamaları

5.2.1. Rotor çapının belirlenmesi

P gücünün Δt süresince etkimesi durumunda enerji denklem 5.2 ile ifade edilir.

$$E = P \cdot \Delta t \quad (5.2)$$

Rüzgar türbininden bir yılda (8760 saat) elde edilecek elektrik enerjisi 2928 Kwh kabul edildiğinde denklem 5.1' den rüzgar türbin yarıçapı;

$R = 1,6$ m. olarak bulunur.

Bulunan türbin yarıçapına göre enerji tekrar hesaplanacak olursa;

$$P = 261,4 \text{ Kwh/ay}$$

5.2.2. Rotorun çevresel hızı

Türbinlerde çevresel hız kanat uç noktasının dakikada metre cinsinden almış olduğu yoldur. Çevresel hız Rüzgar hızı ve kanat sayısı ile doğru orantılı olarak değişir (Köm, 2004).

$$V_\zeta = V \cdot \lambda \quad (5.3)$$

$$V_\zeta = 30 \text{ m/s}$$

Tablo 5.1. Bir Evin Aylık Bazda Enerji Tüketimi (Emniyetli, 2007)

Cihaz Türü	Çalışma Süresi	Güç(W)	Aylık Enerji Tüketimi (Kwh/ay)	Çalışma Süresi (saat)
Buzdolabı	7 gün/hafta	1800	54,1	30
Bulaşık makinesi	3,5 saat/hafta	1500	22,5	4
Çamaşır Makinesi	3 saat/hafta	1250	16,1	3
Elektrikli Süpürge	5 saat/hafta	1100	23,6	5
Elektrikli Fırın	2 saat/hafta	1000	8,6	2
Bilgisayar	15 saat/hafta	200	12,9	18
Müzik seti	12 saat/hafta	150	7,7	12
TV	42 saat/hafta	165	29,7	42
Ütü	1 saat/hafta	1000	4,3	1
Aydınlatma	35 saat/hafta	200	30,0	42
Split Klima	4 saat/hafta	1800	30,9	4
Blender	1 saat/hafta	140	0,6	1
Saç Kurutma Makinesi	1 saat/hafta	400	1,7	1
Mutfak Robotu	1 saat/hafta	300	1,3	1
Toplam Aylık Enerji Tüketimi (Kwh/ay)			244,0	

5.2.3. Rotor çevresi

Rotorun çevresi, kanatların dönme esnasında meydana getirdikleri dairenin çevre uzunluğudur. Kanat uzunluğu ile doğru orantılıdır (Köm, 2004).

$$L_{\phi} = \pi D \quad (5.4)$$

$$L_{\phi} = 10,05 \text{ m.}$$

Burada;

L_{ϕ} : Türbin çarkının çevresi (m)

D : Rüzgar türbini rotor çapı (m)

5.2.4. Rotor devri

Rotorun ve rotora bağlı olarak dönen güç aktarma milinin dakikada yapmış olduğu

devir sayısıdır. Rotor devri, rüzgar hızı ile doğru, kanat sayısı ile ters orantılıdır (Köm, 2004).

$$n_R = \frac{V_\zeta}{L_\zeta} \quad (5.5)$$

$$n_R = 179,1 \text{ dev/dak}$$

Burada;

n_R : Rotor devri (dev/dak)

5.2.5. Rotor süpürme alanı

Süpürme alanı, rotor göbeği ve kanatların dönme esnasında meydana getirdikleri dairenin alanıdır. Kanat uzunluğu ve güç ile doğru orantılıdır (Köm, 2004).

$$A = \pi R^2 \quad (5.6)$$

$$A = 8.04 \text{ m}^2$$

Burada;

A : Rotorun süpürme Alanı (m^2)

R : Rotor yarıçapı (m)

5.2.6. Rotorda oluşan giriş gücü

Rotor alanının boyutları, rüzgarın rotorda oluşturduğu mekanik enerji ile doğrudan ilişkilidir. Kanatların uzunluğu ve rüzgarın çarptığı alan ne kadar büyük olursa güç aktarma milinde meydana gelen momentin dolayısı ile gücün aynı oranda artması beklenir. Havanın yoğunluğu ise bu gücü etkileyen diğer bir faktördür (Köm, 2004).

$$P_R = A.P \quad (5.7)$$

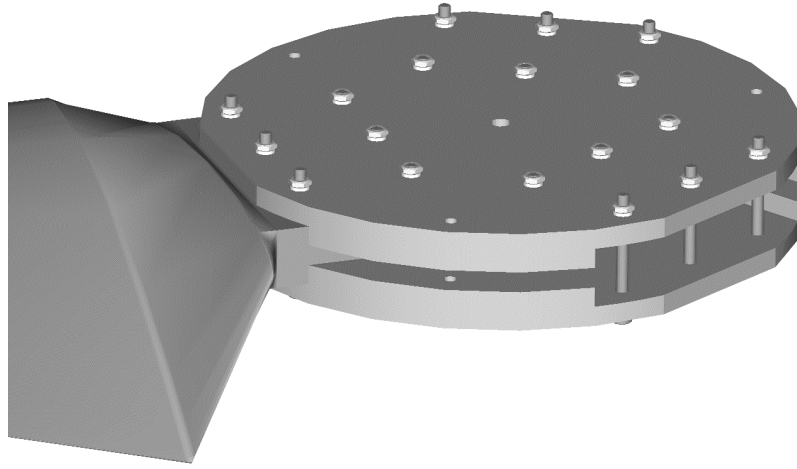
$$P_R = 2918,82 \text{ W}$$

Burada;

P_R : Rotorda oluşan giriş gücü (W)

5.2.7. Rotor milinin yataklanması

İmalatı gerçekleştirilen kanatlar, rotor miline kestamid malzemeler ile bağlanmış ve rotor merkezine gelen rüzgarın kanatlara yönlendirilmesi ve kanat bağlantılarının estetiği açısından hub tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Şekil 5.1' de kanat bağlama elemanları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kanat Bağlantı Elemanları

Rotor mili köprü yataklar ile iki noktadan yataklanmıştır. Yataklanan rotor mili redüktöre ara bağlantı mili ile bağlanmıştır. Şekil 5.2' de rotor mili bağlantı noktaları görülmektedir.

Bir rüzgar türbini tasarımında en önemli noktalardan biriside rotorda oluşan gücün jeneratöre aktarımında kullanılan güç aktarma milidir. Bu mil kendisini etkileyen farklı kuvvetlere karşı dayanabilecek özelliklerde seçilmeli ve çapı bu özelliklere uygun olmalıdır.

$$d_R = \sqrt[3]{\frac{W_d \cdot 32}{\pi}} \quad (5.8)$$

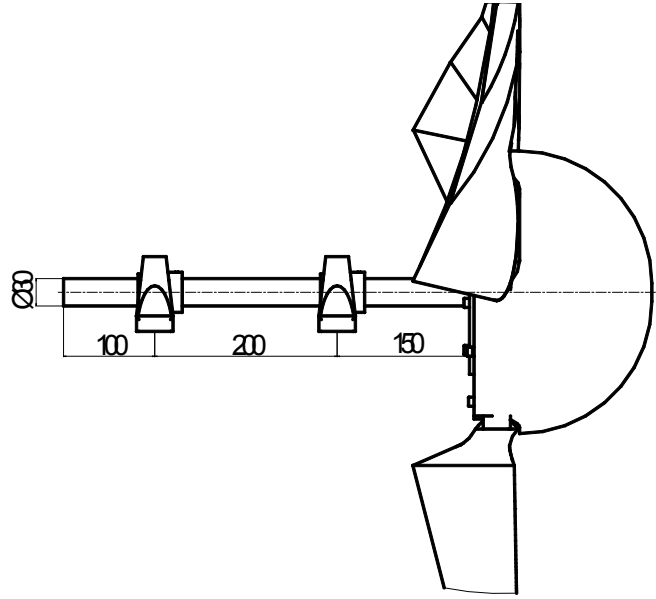
$$d_R = 29,34 \text{ mm}$$

$d_R = 30$ mm seçilmiştir.

Burada;

d_R : Güç aktarma mili çapı (m)

W_d : Direnç momentini



Şekil 5.2. Rotor Mili Bağlantı Şeması

5.2.8. Burulma momentini

Rotor, dönüş sırasında uyguladığı kuvvet (F_2) ile güç aktarma milini burulmaya zorlar (Şekil 5.3). Rotorda oluşan güç miktarı ve devir sayısı mildeki burulmayı etkileyen faktörlerdir.

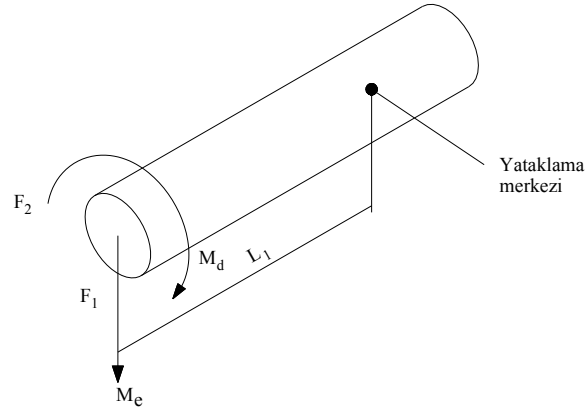
$$M_d = 7025,9 \frac{P_R \cdot 1,36}{n_R} \quad (5.9)$$

$$M_d = 155,69 \text{ Nm}$$

Burada;

M_d : Burulma momentini (Nm)

F_2 : Mili burulmaya zorlayan kuvvet (N)



Şekil 5.3. Rotor Milini Etkileyen Kuvvetlerin Oluşturduğu Momentler

5.2.9. Eğilme momenti

Güç aktarma milinin ucuna monte edilen rotor ve kanatların toplam ağırlığı (F_1) mili birinci yatak mesafesinden eğilmeye zorlar.

$$M_e = F_1 \cdot L_1 = (m_R \cdot g) L_1 \quad (5.10)$$

$$M_e = 26,8 \text{ Nm}$$

Burada;

M_e : Eğilme momenti (Nm)

F_1 : Mili eğmeye zorlayan kuvvet (N)

m_R : Rotorun toplam ağırlığı (kg)

g : Yerçekimi ivmesi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

L_1 : Rotor merkezi ile yatak merkezi arasındaki mesafe (m)

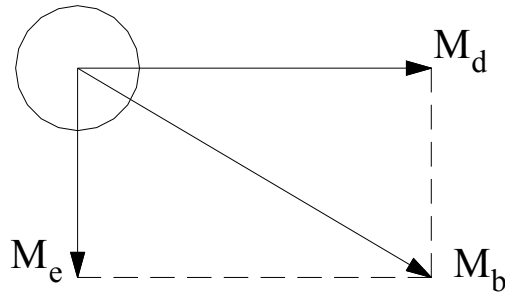
Rotor sistemi kanat, kanat bağlantı flanşı ve flanş şapkasından oluşmaktadır. Kanat ağırlığı 3,5 kg., kanat bağlantı flanşı 2,2 kg. ve flanş şapkası 4,16 kg. dır. Bağlantı elemanlarının ağırlığı ise 1,38 kg. gelmektedir. Buna göre eğilme momenti için toplam ağırlık 18,24 kg. olmaktadır.

Rotor merkezi ile yatak merkezi arasındaki mesafe 200 mm. seçilmiştir. 200 mm. lik bir mesafede türbin gövdesi ile rotor arasındaki mesafede gövde başlangıcı olmaktadır. Rotor milinin yataklanması için 2 adet köprü yatak kullanılmış ve yataklar arasındaki mesafe 200 mm. seçilmiştir. Köprü yataklarda sürtünmeyi en aza

indirmek için tane bilyeli rulmanlar kullanılmıştır. Kullanılan rulmanlar 6006.2ZR serisi 13.000 dev/dak. limit hızına sahiptir.

5.2.10. Birleşik moment

Bir mil yalnızca burulmaya uğramaz, çoğu zaman burulma etkisiyle eğilme etkisi beraber olur (Şekil 5.4). Bu sebeple mili etkileyen kuvvetlere göre birleşik momentin belirlenmesi gerekir.



Şekil 5.4. Burulma, Eğilme ve Birleşik Moment

$$M_b = \sqrt{(M_d)^2 + (M_e)^2} \quad (5.11)$$

$$M_b = 157,98 \text{ Nm.}$$

Burada;

M_b : Birleşik moment (Nm)

5.2.11. Mukavemet momenti

$$W = \frac{M_b}{\sigma_{em}} = \frac{M_b}{\frac{\sigma_{ak}}{S}} \quad (5.12)$$

$$W = 2,48 \text{ m}^3$$

Burada;

W : Mukavemet momenti (m^3)

σ_{em} : Emniyetli gerilme (N/m^2)

σ_{ak} : Akma sınırındaki gerilme (N/m^2) (Ç1060 için 382,59 N/m^2)

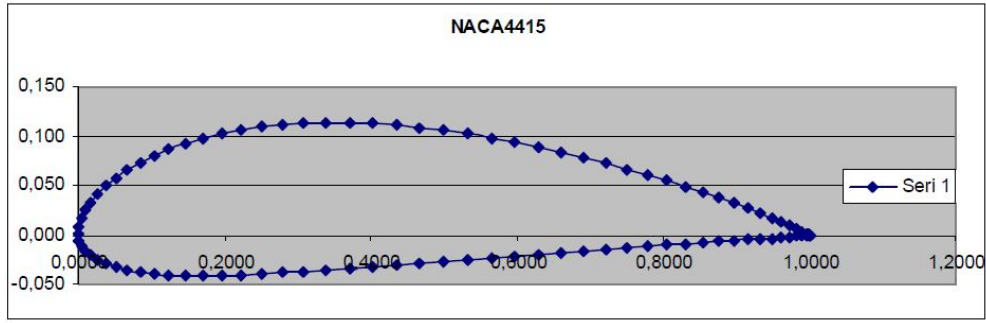
S : Emniyet katsayısı

5.3. Rotor Kanat Profili

5.3.1. Kanat seçimi

Aerodinamik açıdan optimum dizayn için ise α (hücum açısı) ve L/D oranlarının dikkatle seçilmesi gerekmektedir. α açısı küçük, buna karşılık L/D oranı ise maksimum değerlerinde seçilmelidir. Yüksek λ 'lı rüzgar türbinlerinde C_l/C_d oranının büyüklüğünden dolayı tercih edilen kanat profil tipleri NACA 4415 ve NACA 23012'dir (Bu profillerin bazı özellikleri için Tablo 5.2 ve profillerin şekilleri için Şekil 4.2' ye bakınız). Her iki profilin (C_l/C_d) maksimum değerleri birbirine yakın olup 100-125 civarındadır.

NACA 4415 profiline ait şekil 4.3 incelendiğinde $\alpha = 10$ dereceye kadar karakteristiğin doğrusal olduğu görülmektedir. Buna rağmen α açısının sıfır değerinde bir kaldırma mevcuttur. Yani karakteristik orijinden geçmemektedir. Bunun nedeni profilin simetrik olmamasıdır. Simetrik olmayan profile hücum açısı $\alpha = 0$ derece olsa bile kanat etrafında bir sirkülasyon doğar. α büyüdükçe özellikle kanadın sırt tarafındaki basınçlar azalır, akım çizgilerinin eğrilikleri çoğalır ve cidardan ayrılma tehlikeleri baş gösterir. Bu kısımda C_l kaldırma katsayısının daha az arttığı görülür. α açısı daha fazla arttırılırsa belirli bir noktadan sonra ayrılma tam olarak teşekkül ettiği ve kanat sırtında oldukça geniş girdaplı bölge meydana geldiği karakteristik eğrinin devrilmesinden anlaşılmaktadır. Bu noktadan sonra hücum açısının arttırılması kaldırma katsayısını azaltmaktadır (Karadağ, 2009).

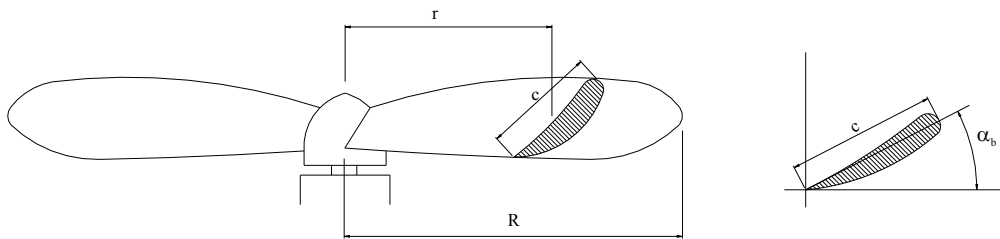


Şekil 5.5. NACA 4415 Profili (Vardar, 2003)

Tablo 5.2. Naca 4415 Profili Kanat Değerleri

α	C_l	C_d	C_l/C_d	L (N)	D (N)
-4	-0,038	0,08	-5,07	-4,68	0,92
8	1,102	0,012	95,00	135,67	1,43
10	1,280	0,012	106,66	157,58	1,48
20	1,304	0,013	99,54	160,54	1,61

Hesaplamalar sonucunda Naca 4415 profilinin 10^0 bağlama açısının C_l/C_d değeri maksimumdur. Kaldırma ve sürüklenme katsayıları doğrultusunda (Eş.4.8 ve Eş.4.9) kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda rüzgar türbininde NACA 4415 kanat profili 10^0 hücum açısı kabulü ile tasarlanacaktır.



Şekil 5.6. Rotor ve Kanat Kesit Düzlemi

Karar verilen kabuller çerçevesinde kanat bağlama açısı ve kanat kiriş boyu hesaplanmış ve kanat tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kanat bağlama açısı denklem 5.13 ve denklem 5.14 ile hesaplanmıştır. (Şentürk, 2007).

$$\alpha_b = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{\lambda.r}\right) - \alpha \quad (5.13)$$

$$c = \frac{1}{B} \cdot \frac{16\pi}{C_l} \cdot r \cdot \sin^2\left[\frac{1}{3} \cdot \arctan\left(\frac{R}{\lambda.r}\right)\right] \quad (5.14)$$

α_b : Kanat bağlama açısı

R : Kanat Boyu (m)

r : Kanat üzerindeki herhangi bir kesidin dönme merkezine olan uzaklığı (m)

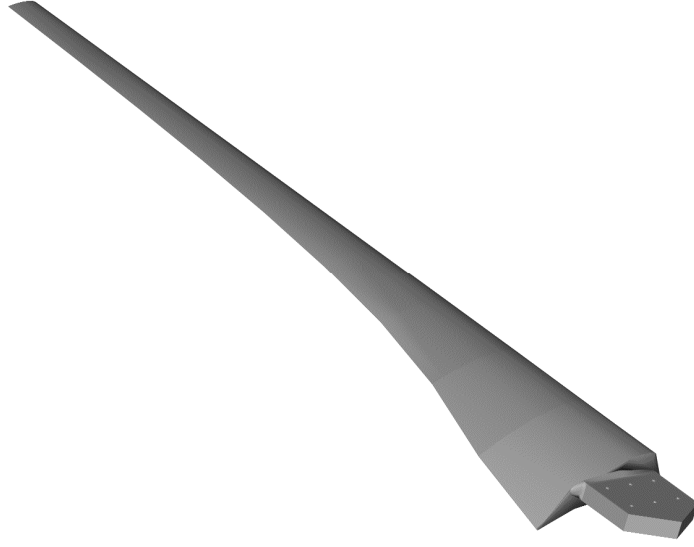
c: Kanat kiriş boyu (m)

Kanat bağlama açısı ve kiriş boyu hesaplanırken kanat boyu belirli aralıklarla bölünmüş ve her istasyon için r değerleriyle hesaplamalar yapılmıştır. Kanat açılarının hesaplanmasında gerekli olan bu r değerinde aralıklarının fazla olması tasarım açısından faydalıdır. Tasarımı düşünülen kanadın rotor miline bağlanması gerekmektedir. Bu bağlantı için rotor merkezinden r = 0,20 m. lik mesafe kullanılmıştır.

Tablo 5.3. Kanat Hesaplamaları Sonucunda Bulunan Bağlama Açıları ve Kiriş Boyları

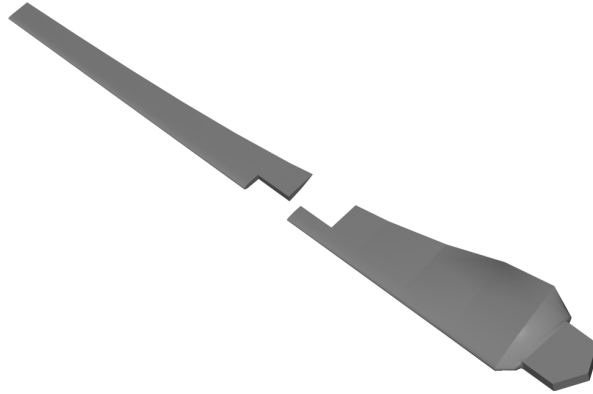
İstasyon	r	Bağlama açısı α_b	kiriş boyu c (m)
1	0,20	25,42	0,2412
2	0,32	16,54	0,2197
3	0,48	9,37	0,1770
4	0,64	5,08	0,1436
5	0,8	2,29	0,1195
6	0,96	0,35	0,1018
7	1,12	-1,07	0,0884
8	1,28	-2,15	0,0781
9	1,44	-3,01	0,0698
10	1,6	-3,69	0,0631

Hesaplanan bağlama açısı ve kiriş boyu değerlerine göre kanat modeli Mechanical Desktop programında modellenmiştir. Modellenen kanat şekil 5.7' de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Modellenen Kanat

Rüzgar türbin kanadını cam elyaf takviyeli poliester esaslı kompozit malzeme ile üretiminin yapılabilmesi için türbin kanat modelinin imal edilmesi gerekmektedir. İmal edilen kanat modelinden poliester döküm kalıbı çıkarılmış ve 3 adet kanat dökülmüştür. Kanat modelinin belirlenen tasarım değerlerinde (Tablo 5.3) üretilebilmesi için CNC dik işlem merkezi kullanılmıştır. Mevcut tezgahın tabla ölçüleri 900x600x600mm olmasından dolayı kanat 2 parça olarak işlenmiş ve işleme sonunda montaj edilmiştir. Kanat yarıları Şekil 5.8’ de görülmektedir.



Şekil 5.8. Tasarlanan ve İmal Edilen Kanat Yarıları

Kanat modelinin imalatı için ağaç malzeme kullanılarak kanat modeli işlenmiştir. Ağaç malzeme olarak MDF kullanılmıştır. MDF (Medium Density Fiberboard) yapay olarak sonradan mühendislik çalışmasıyla üretilmiş bir kompozit ahşap malzemedir. Ağaç talaşlarının yüksek yoğunlukta sıkıştırılması ile elde edilen bir

çıktır. Suya ve ateşe karşı dayanıklı değildir (wikipedia, 2012). 18 mm kalınlığındaki MDF plakalar üst üste yapıştırılarak 1070x230x126 mm ve 1060x140x36 mm ebatlarında kanat model kütükleri hazırlanmıştır. Şekil 5.9' da hazırlanan model kütükleri görülmektedir.

Kanat yarılarının CNC dik işlem tezgahında işlenebilmesi için G kodlarının çıkarılması gerekmektedir. İşleme kodlarının oluşturulmasında Catia Cam modülü kullanılmış ve kalıp yarıları ayrı ayrı işlenmiştir. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11' de kanat yarılarının işlenmesi görülmektedir.



Şekil 5.9. Hazırlanan Bir Model Kütüğü

Ayrı iki parça olarak işlenen kanat modeli montaj edilerek tek parça haline getirilmiş ve çelik macun kullanılarak kanat yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanmıştır.



Şekil 5.10. Kanat 1. Yarısının İşlenmesi

Kanat modelinin hazırlanması aşamasından sonra poliester kalıbı imal edilmiş ve 3 adet kanat dökümü yapılmıştır. Şekil 5.12’ de imal edilen poliester kalıp yarısı ve içindeki model görülmektedir.



Şekil 5.11. Kanat 2. Yarısının İşlenmesi

Poliester kalıbı hazırlanırken model üzerine polyvaks kalıp ayıcı macun 2 kat sürülmüş ve ardından polyvaks kalıp ayırıcı sıvı mamül sürülerek kalıbın modele yapışması önlenmiştir. Bu ön çalışmanın ardından jelkot uygulaması ile kalıplama işlemine başlanmıştır. Jelkot poliester ve hızlandırıcı karışımıdır ve 1 saate yakın bir

sürede kurumaktadır. Uygulanan jelkot cam elyafı ile güçlendirilerek kalıp hazırlanmıştır. Şekil 5.13' te model üzerine jelkot uygulanması gösterilmiştir.

Jelkot, kompozit malzemelerin özellikle cam elyaf takviyeleli plastiklerin (CTP), en üst katmanında yer alan ve yüzey görünüm kalitesini artırmanın yanında, CTP ürünün dış ortam performansını sağlayan malzemedir. Genel olarak jelkotlar, epoksi veya doymamış poliester reçinesi esastır (Uysal, 2003).

Kimyasal açıdan jelkot, modifiye edilmiş yüksek performans poliester reçinelerinden elde edilmektedir. CTP ürün eldesi sırasında kalıp yüzeyine sıvı formda: fırça, püskürtme veya havasız püskürtme yönetimi ile uygulanır. Sıvı formdan katı forma, eklenen MEK-P (Metil Etil Keton-Peroksit) sayesinde kürlenerek ulaşır. Kürlenme (sertleşme), polimerler arasında oluşan çapraz bağlar ile meydana gelir daha sonraki katmanlarla takviye edilerek, klasik kompozit matris meydana gelir. Bu takviye malzemeleri genellikle poliester, epoksi ve vinil ester reçinelerinden, takviye elyafları da cam elyafı, karbon elyafı veya aramid (kevlar) elyafından oluşmaktadır (Uysal, 2003). Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' te model, ürün ve kalıp yarıları görülmektedir.



Şekil 5.12. İmal Edilen Poliester Kalıp Yarısı



Şekil 5.13. Model Üzerine Jelkot Uygulanması



Şekil 5.14. Model, Üretilen Kanat ve Kalıp Yarıları

5.3.2. Kanat sayısının belirlenmesi

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın her tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının asıl sebebi, dönme momentinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinlerde, türbinin yapısı üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, kanat bağlantı göbeğinin içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı 70m/sn altında olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli bir avantaj olup, halk tarafından kabulünü sağlamıştır. Küçük çaplı rüzgar türbinlerinde, üç kanatlı rotor kullanıldığında güç problemleri ortaya çıkar. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını $1/n$ oranında arttıran dişliler kullanılır ve “Cut in” olarak adlandırılan hız değerine ulaşıncaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır.

Rüzgar türbinlerinde en büyük güç 3 kanatlı pervanelerden sağlandığı için kanat sayısı $z=3$ olarak seçilmiştir.

5.3.3. Kanat sayısı ile rotor devri arasındaki ilişki

Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat sayısı 2-24 adet arasındadır. Düşük hızlı türbinlerdeki kanat sayısının çok, yüksek hızlı türbinlerde kanat sayısının az olduğu düşünüldüğünde kanat sayısı ile uç hız oranı arasında ters orantı olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 5.4’ te kanat sayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Kanat Sayısı ve Uç Hız Oranı Arasındaki İlişki

Kanat sayısı	Uç hız oranı (λ)
24	1
5	2
3	6
2	8
1	11

Tasarım hesaplamalarında, rotor 3 kanatlı olduğu için $\lambda = 6$ alınacaktır.

5.4. Jeneratör

Rotor girişinden jeneratör çıkışına kadar bir sürtünme güç kaybı söz konusudur. Dolayısıyla rotorda oluşan gücün tamamı jeneratörden çıkamaz. Elde edilebilecek en yüksek güç, enerji ve momentumun korunumu yasası gereğince, Betz teoreminde de geçtiği gibi varsayılan silindir içinden geçerek kanatların taradığı alana yönelen hava akımlarının sahip bulunduğu tüm kinetik enerjinin maksimum %59,26'sı kadardır. Bu kural yatay eksenli rüzgar türbin sistemleri için bir kesinlik ifade etmekle birlikte, bu tür sistemlerde tüm tasarım çalışmaları bu maksimum verimliliğe erişebilmek için yapılır. Ancak bu güne kadar yapılan yatay eksenli rüzgar türbinleri için en yüksek deneysel verim %45, ortalama yıllık verim ise %20 civarındadır. Yapılan bu tasarım çalışmasında hesaplamalar yapılırken maksimum %59,26 verim esas alınmıştır.

$$P_{\zeta} = P_R \cdot \eta_t \quad (5.15)$$

$$P_{\zeta} = 1729,69 \text{ W}$$

Burada;

P_{ζ} : Elde edilebilir güç (W)

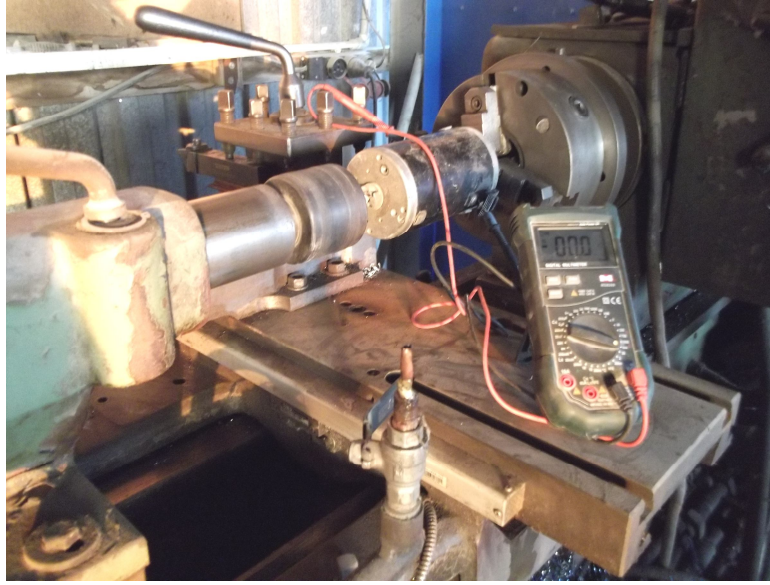
η_t : maksimum türbin verimi

Bir asenkron makine, jeneratör çalışmada makinenin güç kaynağı rotordan alınan mekanik güçtür. Asenkron jeneratörün statoru üç faz grubundan müteşekkil birçok sarıma yataklık yapar. Bu üç grup sargı fiziksel olarak stator etrafına yayılmıştır. Bu sargılar üzerindeki akım akışından dolayı rotor etrafında, çevresinde dönen bir manyetik alan oluşur ki bu manyetik alan asenkron makinenin en önemli çalışma özelliğini oluşturur. Rotor akımı ile stator akımı arasındaki etkileşim bir momente neden olur. Eğer rotora bir rüzgâr türbinine bağlarsak ve senkron hızdan daha yüksek bir hızda döndürürsek, rotorda indüklenen akım ve momentin yönü motor çalışma durumuna göre ters yönde olur. Bu durumda makine jeneratör olarak çalışır. Türbinin mekanik gücünü elektrik gücüne çevirir ve stator uçlarına bağlı yükü besler. Eğer makine şebekeye paralel olarak çalışıyor ise şebekeye güç temin edecektir. Yani makinenin jeneratör olarak çalışabilmesi için senkron hızdan daha yüksek bir hızda

döndürülmesi gerekir. Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik endüksiyon prensibine göre çalışır. Asenkron makine AC uyarım akımına ihtiyaç duyar. Dolayısıyla bu makineler hem kendinden uyarımlı hem de dışarıdan uyarımlı olabilirler. Kendinden uyarımlı asenkron jeneratörlerde stator, 3 fazlı uyarım akım sistemi ile birlikte dizayn edilirse mili rüzgâr türbinine ve dişli kutusuna bağlı olan makine başlangıçta motor olarak çalışmaya başlayacak ve senkron hızı yakalama yönünde hızını arttıracaktır. Rüzgâr hızı jeneratör miline senkron hızı aşacak seviyede etki edince, asenkron makine otomatik olarak jeneratör çalışmaya geçecektir ve elde edilen elektriksel gücü stator sargıları üzerinden şebekeye aktarılacaktır. Bu süreçte 3 fazlı mıknatıslanma akımı, makine şebeke ile paralel çalışıyor ise, bu akım şebekeden temin edilecektir. Bununla birlikte, makine harici bir kondansatör bağlayarak makinenin ihtiyacı olan uyarım akımı şebekeye ihtiyaç olmaksızın sağlanmış olur (Apaydın, 2007).

Senkron jeneratörler bağlandıkları şebeke ile aynı frekansta çalışır ve asenkron jeneratörlere kıyasla kendini mıknatıslama avantajına sahiptir. Şebekeden reaktif güç ihtiyacı duymazlar. Bu daha kaliteli güç sağlanmasını sağlar. Bu avantajın önemi, rüzgâr santrali küçük kapasiteli bir şebekeye uzun ve düşük gerilimli hatlarla bağlandığı zaman daha da ön plana çıkar. Fakat bu jeneratörler hassas bir düzenlemeye ihtiyaç duyarlar ve şebekeye bağlanmaları hassas bir işlem gerektirir. Kontrol sistem bağlantıları daha karmaşıktır. Bir kontrol sisteminde takometre, voltmetre, fazmetre, şebeke ile otomatik bağlantıyı sağlayan cihaz ve rüzgâr kesildiğinde veya şebeke gerilimi sıfıra düştüğünde bağlantının kesilmesini sağlayan ters güç rölesi bulunur. Senkron jeneratörün şebekeye bağlanması hassas bir düzenleme ister ve bu işlemin sık yapılması gerektiği için sorunlar ortaya çıkar. Jeneratör şebekeye tam senkron hızda, senkron jeneratör gerilimi ile aynı fazda ve değerinde iken bağlanmalıdır. Bu zorlukların üstesinden büyük damperler kullanılarak gelinebilir. Damperler senkron jeneratöre indüksiyon motoru gibi yol verilmesini sağlayan sincap kafes şeklinde bobinlerdir ve şebekeye bağlantı yapıldığında oluşan salınımların azaltılmasını veya bastırılmasını sağlarlar. Maliyet açısından da senkron jeneratörler, asenkron jeneratörlere göre maliyeti daha yüksek olan makinelerdir. Bu sebeple daha düşük maliyetli olan, bağlantı kolaylığı sunan ve daha güvenilir sistemler olan asenkron jeneratörler rüzgâr türbini uygulamalarında daha sıklıkla

kullanılmaktadır (Emniyetli, 2007).



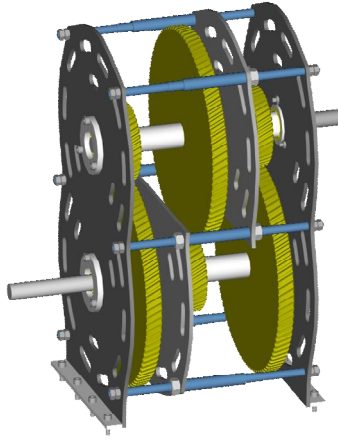
Şekil 5.15. Jeneratör Motorunun Tahrik Edilmesi

5.5. Dişli Kutusu Tasarımı

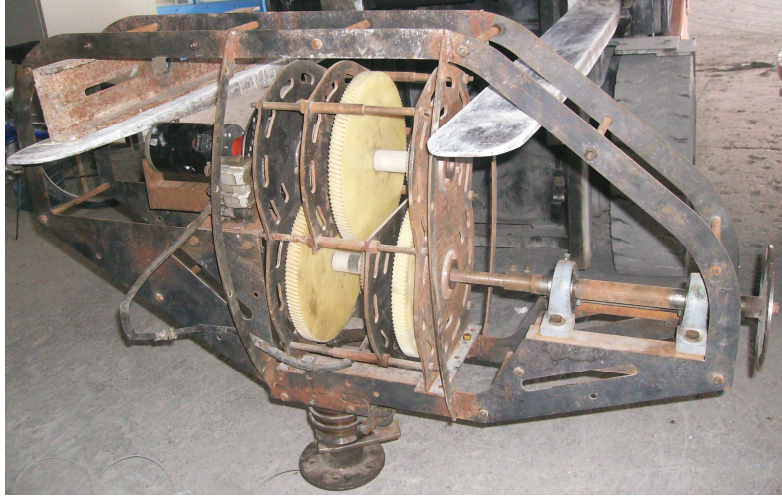
Dişli kutusu tasarımı, kullanılan jeneratör sistemi tasarıma yön vermektedir. Jeneratörün hangi devir aralıklarında istenen voltaj ve akım değerlerini ürettiği tespit edilmeli ve sistem bu yönde tasarlanmalıdır. Dişli kutusu kullanılması sistemin verimini düşürmekle beraber AC çıkışlı jeneratörlerin kullanıldığı rüzgar türbinlerinde kaçınılmaz bir sistem elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Jeneratör 650 - 700 dev/dak.da 12 V çıkış verdiği için rotor giriş devri olan 35 dev/dak değeri, 650 ile 700 dev/dak aralığında olması gerektiği görülmektedir. Dişli kutusu tasarımında giriş gücü 2,92 Kw.'tır.

Dişli kutusu tasarımında 700 dev/dak. değerine ulaşmak için 3 kademeli ve helisel dişlilerden oluşmuş bir dişli kutusu tasarımı yapılmıştır. Bilgisayar ortamında modellenen dişli kutusunun (Şekil 5.16) imalat detayları çıkarılmış ve imal edilmiştir. Dişli malzemesi olarak kestamid malzeme kullanılmıştır. Torna tezgahında iç delik, dış çap ve kalınlık işlenmiştir. Tornalama işleminin ardından dişli açtırma işlemi piyasada yaptırılmıştır. Dişlilerde modül 2 mm, diş açısı 60° 'dir.



Şekil 5.16. Tasarlanan Dişli Kutusu



Şekil 5.17. Üretimi Yapılan Dişli kutusu

5.6. Platform ve Kule

Sistemin mekanize bölümlerinin tümünü üzerinde bulunduran platform, çelik konstrüksiyondan ve gürültü kirliliğini azaltmak amacıyla ses izolasyonlu olarak imal edilmektedir. Platform bir mil vasıtası ile konik veya bilyeli radyal rulmanlarla kuleye, çevresinde dönebilecek şekilde yataklandırılır. Kule yüksekliği rüzgar hızına etkili bir faktör olduğundan tasarımının hem çevrim sisteminin gücüne hem de mukavemetine göre yapılması gerekmektedir. Kule, sistem büyüklüğüne göre çelik koni boru, çelik kafes, çelik silindir, beton konik boru ya da silindir biçiminde imal edilebilmektedir. Kule yükseklikleri 70 m'ye dek ulaşabildiğinden, kafes kulelerin dışındaki konstrüksiyonlar iki ya da üç parçalı olabilmektedir. Kafes kuleler görüntü

kirliliği nedeni ile pek tercih edilmezler. Türbin gücü, rüzgar hızının, süpürme alanının ve gücü faktörünün fonksiyonudur. Rüzgar hızı yükseklikle arttığından, aynı çaplı bir rüzgar rotorunun daha yüksek kuleye yerleştirilmesi ile elde edilebilecek gücü artmakta ise de, kule ağırlığının ve maliyetin artması bir sınır koymaktadır (zgr, 2002). Tasarımı yapılan türbinde kule için 6 metre boyunda elik boru kullanılmıştır. Borunun her iki başına bağlantı flanşı kaynatılmıştır. Zemin bağlantısı için çevrede 6 adet M16 cıvata bağlantısı kullanılmıştır (şekil 5.18, şekil 5.19).



şekil 5.18. elik Boru Zemin Bağlantısı

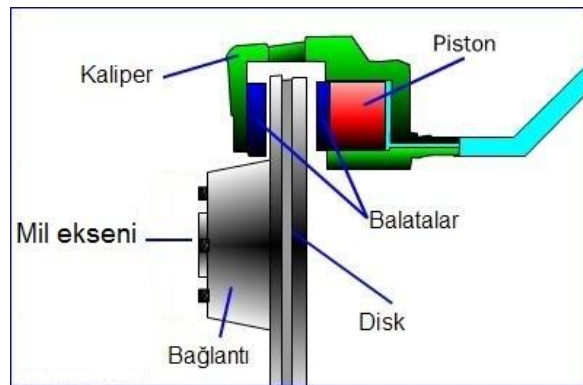


şekil 5.19. elik Boru Zemin Ankrajı

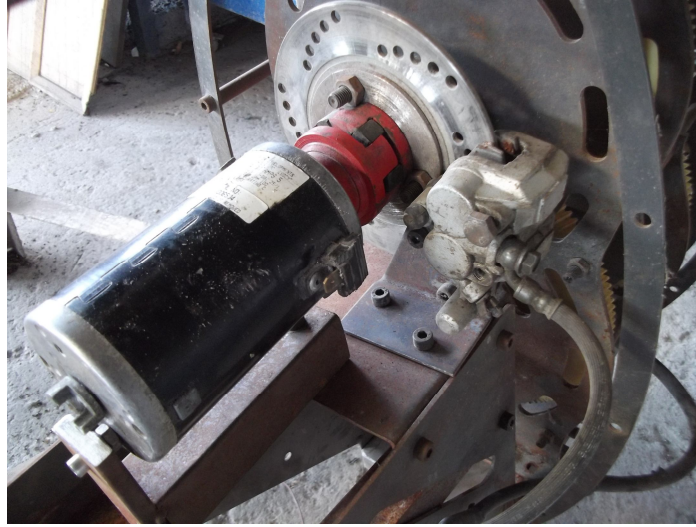
5.7. Fren

Rüzgardan elde edilen enerji, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile yüksek rüzgar hızlarında meydana gelebilecek kuvvetler tahmin edilebilir. Bu kuvvetleri kontrol altına alabilmek için fren sistemi kullanılmaktadır. Özellikle fırtınalı havalarda rüzgara karşı küçük bir yüzey çıkarmak, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Bu sonuçları elde etmek amacıyla çeşitli sistemler uygulanmaktadır. Bunlardan birisi de Şekil 5.20’ de gösterilen mekanik fren düzenidir. Mekanik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Hidrolik sistem türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur (Karadağ, 2009).

Devir sayısının belirli bir değerden sonra sabit tutulması, belirli bir sınırı aşmasına engel olması, çarkın ve palaların korunması yönünden çok önemlidir. Tasarımı gerçekleştirilen rüzgar türbininde jeneratör devri 700 dev/dak. sınırını aştığında fren sistemi devreye girecektir. Aynı zamanda türbinde bir arıza meydana geldiğinde sistemi tamamen durdurmak için kullanılmıştır. Şekil 5.21’ de rüzgar türbini tasarımında kullanılan fren mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Mekanik fren şematik görünümü



Şekil 5.21. Kullanılan Mekanik Fren Düzenegi

5.8. Yönlendirici

Çeşitli yönlerden esen rüzgarlardan yararlanabilmek için türbin gövdesinin, her an rüzgar doğrultusuna dikey konumda olması istenir. Bu yöneltme, ya çark düzlemine dikey olan büyük düzeyli bir dümenle veya yardımcı bir çarkla otomatik olarak sağlanabilmektedir (Emniyetli, 2007) Tasarımda kullanılan yönlendirici şekil 5.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Yönlendirici

5.9. Elektriğin Taşınması

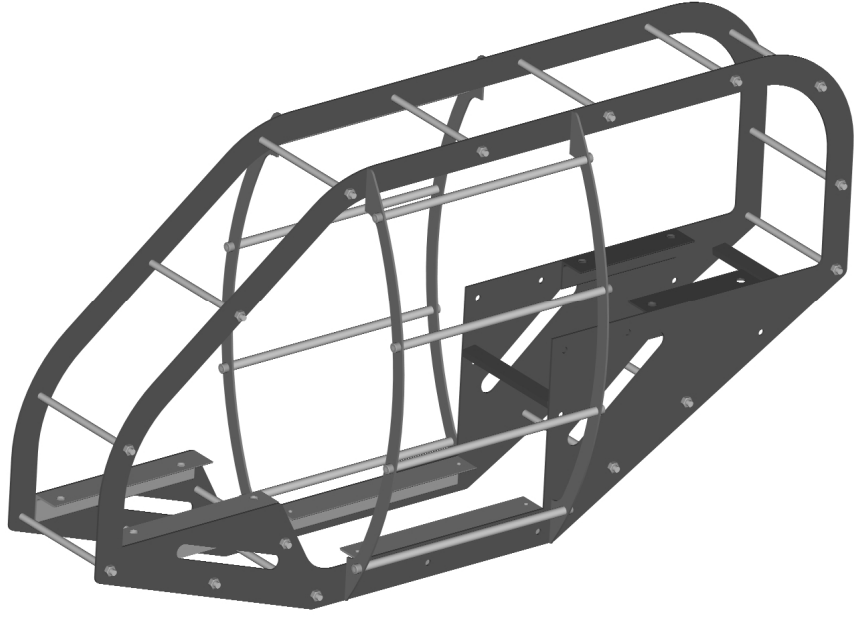
Kablolar türbin jeneratöründen akımı kule boyunca taşırlar. Eğer türbin uzun bir zaman için sağa sola dönerse bu durumda kablolar birbirlerine karışır. Bu sebepten dolayı kabloların bir birine karıştığını ve düzeltilmesi gerektiğini haber veren bir sayıcı bulunur. Diğer güvenlik ekipmanları gibi bu durum içinde yedek kurtarma sistemi bulunmaktadır. Bu sistem acil durumlarda (kabloların birbirine çok karıştığı) türbinin pull anahtarı yardımıyla devreden çıkarılması sistemidir . Şekil 5.23' te kablo sarımını engellemek amacı ile kullanılan sistem fırça sistemi gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Kablo Sarımını Engellemek Amacı İle Kullanılan Fırça Sistemi

5.10. Ana Gövde

Rüzgar türbinlerinde kullanılan rotor, dişli kutusu, jeneratör, bağlantı elemanları, elektriksel kontrol elemanları ve bağlantı elemanlarını üzerinde taşıyan yapıdır. Tasarımı yapılan Rüzgar türbini çalışmasında gövde hareket elemanları ve jeneratörü içinde barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Gövde içindeki elemanları herhangi bir arıza durumunda dışarı alınması gerekmektedir. Bunu sağlamak için gövde parçalı olarak imal edilmiştir. Montaj için civata ve somun kullanılmıştır. Şekil 5.24' te tasarımı yapılan gövde ve şekil 5.25'te imal edilen türbin gövdesi gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Tasarımı Yapılan Türbin Gövdesi



Şekil 5.25. İmal Edilen Türbin Gövdesi

5.11. Rüzgar Türbin Montajı

Rüzgar türbini tasarımında montaj önemli bir adımı teşkil etmektedir. Türbinin

dikilmesinde ağırlık merkezinin tespit edilmesi gerekmektedir. Türbin verimliliğinin artmasında kanatların rüzgardan en uygun şekilde yararlanmasını sağlamak amacıyla türbin dikildiği direk ekseninde dönmesi gerekmektedir. Ağırlık merkezi türbin montajı bitirildikten sonra bulunmuştur. Türbinin direk eksenini etrafında dönmesini sağlamak amacıyla araç poryesi kullanılmıştır. Porye üzerine fırça sistemi giydirilmiştir. Tasarımda porye ile fırça sisteminin yer kaplamasının önüne geçmek için porye tornalanmıştır. Şekil 5.26’ da ağırlık merkezine montaj edilen porye ve poryeye giydirilen fırça sistemi gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Porye ve Fırça Sistemi

Rüzgar türbini montajında öncelikle rotor mili montaj edilmiş ardından dişli kutusu ile akuple edilmiştir. Dişli kutusu çıkışına fren tertibatı bağlanmış ve jeneratör montajı gerçekleştirilmiştir. Fren tertibatı kumandası için çelik fren teli kullanılmış ve porye merkezinden geçirilmiştir. Türbin içindeki elemanlar montaj edildikten sonra kanatlar ve yönlendiricinin montajı gerçekleştirilmiştir. Türbin elemanlarının olumsuz hava şartlarından korunması amacıyla branda sistemi ile kaplanmıştır. Şekil 5.27’ de montaj edilmiş türbin gövdesi gösterilmiştir.

Montaj edilen türbin ankraj zeminine forklift yardımıyla taşınmıştır (Şekil 5.28). Rüzgar türbin direği ve türbin gövdesi zeminde montaj edilmiştir. Montaj işleminde 12 metre yüksekliğe ulaşabilen iş makinesi kullanılmıştır. Şekil 5.29’ da sistemin Ankraj Zeminine Montaj Edilmesi gösterilmiştir. Şekil 5.30’ da ise rüzgar türbinin

montajlı hali görülmektedir.



Şekil 5.27. Montaj Edilmiş Türbin Gövdesi



Şekil 5.28. Rüzgar Türbininin Ankraj Zeminine Taşınması



Şekil 5.29. Sistemin Ankraj Zeminine Montaj Edilmesi



Şekil 5.30. Montaj İşlemi Tamamlanan Türbin

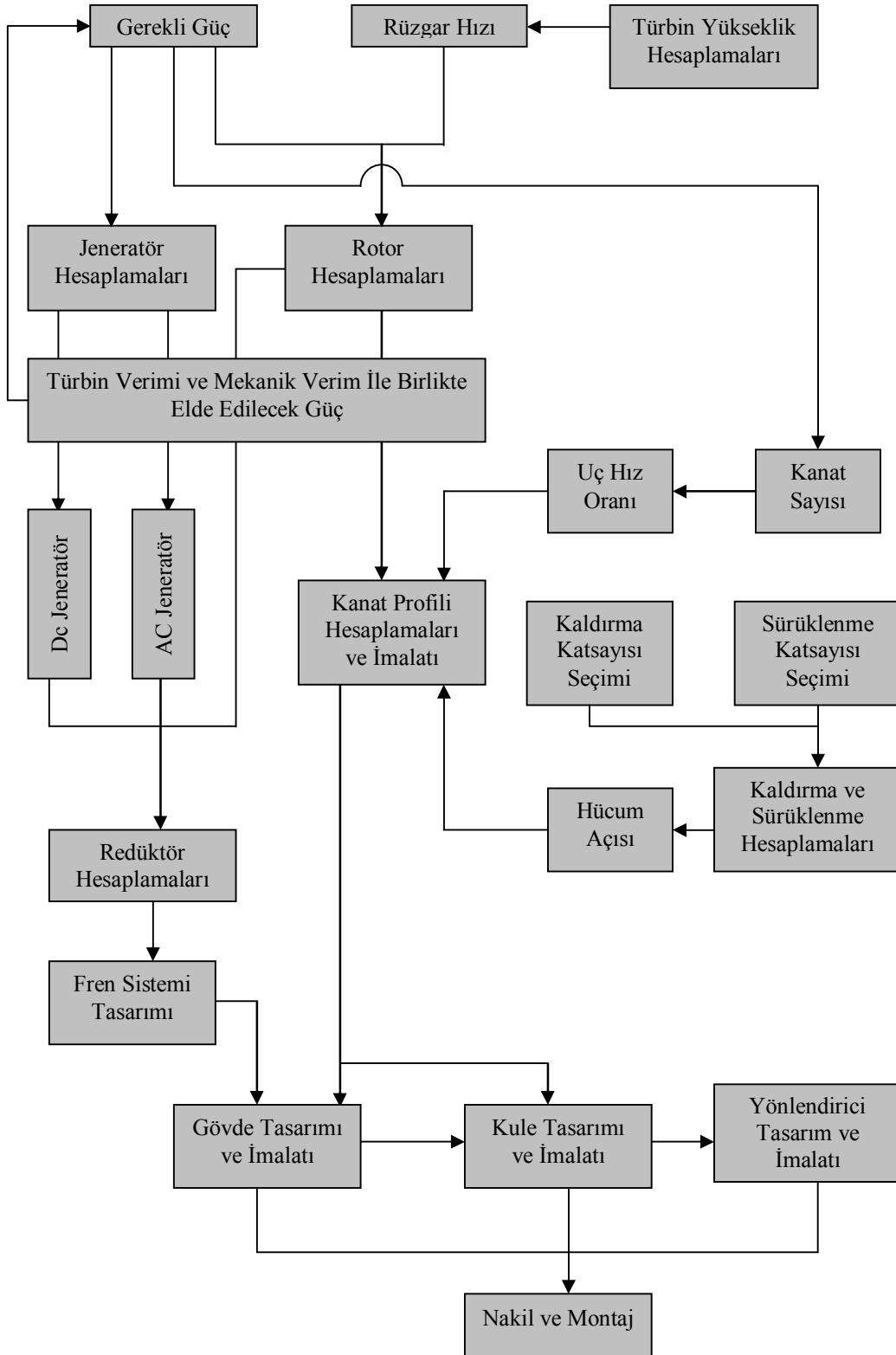
BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye rüzgar enerjisi bakımında zengin bir ülkedir. Mevcut kurulu kapasite rüzgar enerji potansiyelinin çok altında kalmıştır. Ülke olarak bu potansiyeli kullanmak enerji bağımlılığını ve çevre sorunlarını büyük ölçüde azaltacaktır. Dünya ülkeleri arasında rüzgar enerjisine yatırımlar göz önüne alındığında Türkiye olumlu bir ivme yakalamıştır. Bu gelişimin süratle hızlandırılması ve diğer alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ulusal bir gerekliliktir.

Bu çalışmada bir evin enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede rüzgar türbini tasarımı yapıldı ve tasarım imal edildi. Tasarımın gerçekleştirilmesinde rüzgar hızı sabit kabul edildi ve 5 m/sn alındı. Bir evin aylık enerji ihtiyacı 244 Kws/ay olarak tespit edildi. Kabul edilen sabitler çerçevesinde türbin gücü ve diğer türbin elemanlarının hesaplamaları gerçekleştirildi. Hesaplamalarda elde edilen veriler ışığında türbin modeli tasarlandı ve 3 boyut modeli oluşturuldu. Oluşturulan modelin imalat resimleri çıkarıldı ve türbin imalatı gerçekleştirildi.

Rüzgar türbini kanat profili seçiminde kaldırma ve sürüklenme katsayıları tasarıma yön vermektedir. Kanat profili seçiminde önemli bir etken olan kanat kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değerlendirilmesinde daha önce yapılmış NACA 4415 kanat profili çalışmaları etkili olmuştur. Tasarımın ilk ve en önemli aşaması olan kanat seçiminde türbinden üretilmesi hedeflenen güç önemli bir basamağı teşkil eder. Tasarım hesaplamalarında türbinin üreteceği gücün bilinmesi gerekmektedir. Kanat hesaplamaları bu değere göre yapılmalıdır. Kanat giriş boyu ve hücum açısı türbinin aerodinamik verimini ortaya koymaktadır. Bu sebeple türbinin en önemli elemanı olarak karşımıza çıkar.

Hesaplama, tasarım ve imalatı yapılan türbin çalışmaları ışığında Şekil gösterilen algoritma oluşturulmuştur.



Şekil 5.31. Rüzgar Türbini Tasarım ve İmalat Algoritması

Rüzgar türbin kanadının performansı, kanat profilinin doğru seçilmesi ile birlikte kanat imalatındaki hassasiyet ve kanat malzemesinin seçimi ile yakından ilgilidir. Bu sebeple kanat imalatında poliester üretim metodu kullanıldı. Kanadın poliester üretiminde kanat içi boş, rotora bağlandığı kısım dolu olarak imal edildi. Bu imalat kanadın ağırlık merkezinin rotor eksenine yakın olmasına sebep olmuş ve sistemin ilk harekete geçmesi için bir dezavantaj oluşturmuştur. Kanadın iç kısmının boş olması yüksek rüzgar hızlarında istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Bundan dolayı kanadın hafif bir malzeme ile içinin doldurulması ve ağırlık merkezinin dikkate alınması gerekir.

Poliester üretimde modelin bire bir kopyası elde edilmektedir. Bunun için model olarak üretilen kanat ölçü kontrolleri dahilinde yüzeyi pürüzsüz duruma getirilmelidir. Modelden elde edilen kalıp yarıları esnek bir yapıya sahiptir ve zeminin durumuna göre şekil değişikliğine uğramaktadır. Bunun önüne geçmek için kalıpların esnememesini sağlamak gerekir. Bilgisayar ortamında modeli oluşturulan kanattan farklı kesitlerde destek parçaları çizimleri elde edilebilir. CNC kontrollü lazer sac kesim tezgahlarında kalıp altlıkları imal edilebilir.

Kanatların bağlandığı rotor ve rotor mili kanatlardan gelen hareketi dişli kutusuna aktarır. Bu aktarmada rotor, rotor miline 90^0 derece dik açı ile bağlanmalıdır. Aksi halde rotor yatakları hızlı bir şekilde bozulur ve sistemde önemli verim kayıpları oluşur. Bunun önüne geçmek için rotor mili ve rotora kaynatılmış alın flanşı kullanıldı. Açığı sağlamak için torna tezgahında işleme yapıldı.

Rüzgar türbini tasarımlarında kanat sayısına göre kanatların rotora eşit açıyla bağlanmaları gerekir. Bunun sağlamak için gerekli parçalar CNC dik işlem merkezinde imal edildi (Şekil 5.1).

Sisteme yataklık eden ana gövde, sistem elemanlarının muhafazası için kalın branda ile kaplanmıştır. Bu yöntemde sistemde oluşan ısı göz ardı edilmiştir. Ana gövdenin poliester ile kaplanması daha estetik bir görünüm sunmakla birlikte sistem için gerekli hava kanallarına elverişlidir fakat pahalıdır.

Rüzgar türbini hesaplamalarında dişli kutusu giriş devri ve torku kanat verimi ile doğrudan ilgilidir. Üretilen kanatların verimi ölçülmeli, dişli kutusu tasarımı ve imalatı gözden geçirilmelidir. İmal edilen dişli kutusunda dişli malzemesi olarak kestamid kullanıldı. Bu malzeme talaş kaldırmaya elverişli olmakla birlikte pahalıdır. İşleme avantajı için tercih edilmiştir. Bu tercih ile birlikte dişli kutusu ebatları büyümüş ve ana gövde tasarımında en büyük eleman olmuştur. Kestamid malzeme yerine çelik malzeme ile birlikte, dişli adım ve diş açılarının en küçük değerde kullanılması verimi arttırabilir.

Dişli kutusunun dış gövdesi için sac malzeme kullanıldı. Bu malzemeler CNC lazer sac kesim tezgahında imal ettirildi. Mil yataklamaları için tornada rulman yatakları imal edildi. Sistem montajında imalat hatalarından dolayı dişli kutusu çıkış mili yalpalı dönmekte ve fren sistemi için olumsuz bir durum oluşturmaktadır. Dişli kutusu gövde imalatında rijitlik ön plana alınmalı ve tasarım etkenlerinden biri olarak değerlendirilmelidir.

Rüzgar türbininin rüzgarda en verimli şekilde yararlanması kanatların rüzgara dik konuma gelmesi gerekir. Türbin ağırlık merkezine porye sistemi montaj edilmiş ve türbinin kule ekseninde serbest dönmesi sağlanmıştır. Türbin gövdesi imalatından sonra tasarlanan bu sistem rüzgar türbini için kullanışlı olmuş fakat estetik açıdan olumsuz bir görüntü oluşturmuştur. Rüzgar türbini tasarımında tüm detayların dikkate alınması estetik görünüm için gereklidir.

Rüzgar türbini kulesi için 6 metre boyunda çelik boru kullanıldı. Kullanılan boru 4 adet ankraj ile sabitlendi. Ankrajlar 100x100x100 cm. ebatlarından donatılı betona sabitlendi. Yaklaşık olarak 2.5 ton gelen bu beton kütle türbin sistemi için rijitlik sağlamış ve 6 metrelik çelik boru için çelik halat germeye ihtiyaç kalmamıştır. Kule yüksekliği arttıkça çelik halatlar ile kule rijitliği sağlanmalıdır.

Rüzgar türbininin yerine nakli ve türbinin montajı sırasında gerekli güvenlik tedbirleri alınmalı, montaj sırası önceden belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

AĞÇAY M., Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Arz Talep Dengesinin Tespiti, Üretim Projeksiyonuna Yönelik Rüzgar Elektrik Santrali Tasarımı RES'in Kurulum Maliyetlerinin ve Üretim Parametrelerinin Analizinin Matlab&Simulink İle Yazılan Programda Yapılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bitirme Tezi, 2007.

ANONİM, Dalga Enerjisi, Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı: 457, Sf. 43., 2005.

ANONİM, Sürdürülebilir Kalkınma ve Nükleer Enerji, TAEK, 2000.

APAYDIN, M., ÜSTÜN, A. K., KURBAN, M., BAŞARAN. Ü., Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, 2009.

AYDIN. İ., Küçük Güçlü Bir Otonom Rüzgar Enerjisi Çevrimi İle Elektrik Eldesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2008.

AYGUN. E., "Güneş Enerjisi Nedir, Nasıl Faydalanılır?", Tübitak Bilim Ve Teknik Dergisi, Sayı 257, Sayfa 22, 1989.

BİLİM VE TEKNİK DERGİSİ, Sayı 340, Sf. 50-55, 1996.

ÇOLAK, O., Değişken Rüzgar Hızlarına Uygun Bir Türbin Modeli Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2000.

DEMİR. F.N., Rüzgar Türbinleri, Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2007.

DÜNDAR. C., Rüzgar Enerjisi ve Türkiye Atlası, [ww.atmosfer.itu.edu.tr/ bildiriler /431.pdf](http://ww.atmosfer.itu.edu.tr/bildiriler/431.pdf), 2003.

EMNİYETLİ. G., Eysel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.

ENA MÜHENDİSLİK, Yelkapanların Denetim Teknolojisindeki Temel İlkeler, 2007.

ERGÜR, Ö., Rüzgar Türbinleri İle Enerji Üretimi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 2006.

JOHNSON, G. L., Wind Energy Systems: Electronic Edition. Manhattan, KS, 2001.

KARADAĞ, H. İ., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.

KARADENİZ, Z., Rüzgar Enerjisi ve Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanımı, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2002.

Köm L., Rüzgar Türbininin Bilgisayar Destekli Tasarımı ve Prototip İmalatı, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, 2004.

ONAT, C., ÇETİN Ş., Rüzgar Tünelindeki Kanat Profilinin Dikey Hareketinin Modellenmesi, Mühendis ve Makine, Sayı 522, 2003.

ÖNDER M., Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Bilgisayar Destekli Tasarımı, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.

ÖZAKTÜRK, M., Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2007.

ÖZGÜR, M. A., Kütahya'da Seçilen Bir Konumda Rüzgar Verileriyle Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Bulunması, , Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.

RAPOR, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Enerji Raporu, 2010.

ŞEN, Ç., Gökçeada'nın Elektrik İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.

ŞENTÜRK, U., Bir Rüzgar Türbininin Performansının Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.

TACER, E., Elektromekanik Enerji Dönüşümü, İTÜ, Elektrik Elektronik Fakültesi, Ders notları, 2005.

TEKİN, K., Rüzgar Santrali İçeren Elektrik Sistemlerinde Etkilenmeler Ve Kısa Devre İncelemesi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2006.

ULTANIR, M.O., Rüzgar Enerjisi, Tübitak Bilim Ve Teknik Dergisi, Sayı:341, Sf. 56, 1996.

UYSAL, A., Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Olarak İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.

ÜNALAN, S., www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/...enerji/alt_enerkayders_notlari., 2011.

VARDAR, A., EKER, B., Trakya Yöresi Kırsal Kesiminde Kurulabilecek Rüzgar Türbinleri İçin Öneriler, II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, İzmir, 2003.

www.3de3enerji.com., 2012.

www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Mavi_Kitap_2010.pdf, 2011.

www.enerji.gov.tr., 2011.

www.enerjik.com.tr., 2012

www.tureb.com.tr, 2012.

www.wikipedia.org, 2012.

www.windenergy.org, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Davut Keleş, 1978'de Van'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 1996 yılında Sakarya Teknik Lisesi, Makine Bölümünden mezun oldu. 1999 yılında başladığı ZKÜ Makine Eğitimi bölümünü 2003 yılında bitirdi. 2005 yılında prefabrik beton elemanları üretimi için kalıp tasarımı ve makineleri üzerine özel sektörde çalışmaya başladı. Tasarımını yapmış olduğu birçok beton kalıbı ve makineler vardır. Halen prefabrik beton elemanları sektöründe tasarım ve firma sorumlusu olarak devam etmektedir.